Tesis Doctoral

PAISAJES, REDES Y SOCIEDAD EN EL CONTEXTO DEL MAR DE LIBIA

Desde el Bronce Final hasta Época Romana (ss. XV a.C. - IV d.C.)



David Laguna Palma

UNIVERSIDAD DE GRANADA

TESIS DOCTORAL

PAISAJES, REDES Y SOCIEDAD EN EL CONTEXTO DEL MAR DE LIBIA

Desde el Bronce Final hasta Época Romana (ss. XV a.C. – IV d.C.)



UNIVERSIDAD DE GRANADA

AUTOR

DAVID LAGUNA PALMA

DIRECTORES/AS

DR. ANDRÉS Mª ADROHER AUROUX
DRA. HELENA JIMÉNEZ VIALÁS
DR. ANTONIO J. MORALES RONDÁN

PROGRAMA DE DOCTORADO EN HISTORIA Y ARTES
DEPARTAMENTO DE PREHISTORIA Y ARQUEOLOGÍA
GRANADA, 2025

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: David Laguna Palma
ISBN: 978-84-1195-780-9
URI: https://hdl.handle.net/10481/103599

Cuando la travesía emprendas hacia Ítaca,
pide que sea largo tu camino,
lleno de aventuras, pleno de saberes…

Σα βγεις στον πηγαιμό για την Ιθάκη,
να εύχεσαι να 'ναι μακρύς ο δρόμος,
γεμάτος περιπέτειες, γεμάτος γνώσεις.

Cavafis, C. P. (1911/2015). *Ítaca* (V. Fernández González, Trad.). Nórdica libros.

A mi familia
A Rebeca
A Max

AGRADECIMIENTOS

Llegar hasta aquí no ha sido fácil. Ha sido un camino lleno de retos en lo profesional y otras marcadas experiencias, no tan buenas, en lo personal, y si algo he aprendido en todo este proceso es que, tanto en la academia como en la vida, uno nunca recorre este camino solo (aunque muchas veces se sienta así). Detrás de cada paso, cada decisión, cada error y cada pequeño avance, siempre hay personas que te apoyan, te empujan y te sostienen, tanto en lo personal como en lo profesional, y este es el momento de darles las gracias.

En primer lugar, quiero agradecer al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, así como al Vicerrectorado de Investigación y Transferencia de la Universidad de Granada y a aquellos académicos/as que formaron parte de la evaluación de mis solicitudes y que, finalmente, me concedieron el apoyo y la financiación necesaria para desarrollar esta tesis doctoral. Gracias por permitirme dedicar estos años a poder desarrollarla en todas sus facetas. Por supuesto, también quiero dar las gracias a mis directores de tesis por haberme dado la libertad de desarrollar este proyecto como yo quería hacerlo y por su apoyo, incluso cuando yo mismo mostraba dudas a la hora de defenderlo. Gracias también a los alumnos/as a los que he tenido la suerte de dar clase en estos años. Sin saberlo, me han mostrado un camino que me apasiona y que espero seguir recorriendo.

A mis compañeros/as del Departamento de Prehistoria y Arqueología y de la Facultad de Filosofía y Letras, desde los más veteranos hasta los más noveles. No nombraré a cada uno/a para no ser injusto, pero quienes realmente me han mostrado su cariño y respeto en distintos momentos de este camino saben quiénes son. Gracias por ello. En especial, quiero destacar estos últimos años,

en los que el departamento no ha dejado de crecer, recibiendo a excelentes investigadores/as de diferentes lugares, pero, sobre todo, a buenas personas. Esto ha ayudado a crear un ambiente cada vez más "familiar", que ha hecho que este proceso sea mucho más llevadero, especialmente en estas últimas etapas. En este sentido, no puedo dejar de mencionar a algunas personas que considero han sido fundamentales en mi trayectoria hasta aquí. En primer lugar, Paco Contreras, director del departamento. Paco, hace tiempo escuché que en la academia hay dos tipos de personas: facilitadoras y las que no lo son, y sin ninguna duda, tú siempre has hecho que las cosas sean más fáciles, apoyando en todo momento. Te doy las gracias por ello.

A Carlos Rodríguez Rellán. Dicen que, a veces, la vida te cruza con personas que te acaban marcando, y creedme si os digo que él ha sido una de las más importantes. Desde que lo conocí, no solo me ha apoyado, guiado e inspirado, sino que ha sido un pilar fundamental en este camino. Estoy seguro de que, sin su ayuda, paciencia y guía, no estaría escribiendo estas palabras. Así que gracias, Carlos, por tu tiempo y por tu respeto. Gracias por ser cariñoso cuando hacía falta y por ser claro cuando era necesario y, sobre todo, gracias por enseñarme, de todas las formas posibles, cómo recorrer este camino con seriedad, respeto y humildad. Gracias por todo.

A Pablo Barruezo. Lo menciono aquí, aunque bien podría hacerlo en el apartado personal, porque encarna todo lo que significa la palabra "amistad". Desde que nos conocimos durante la carrera, nuestro ímpetu por mejorar nos ha empujado constantemente, y recorrer este camino juntos, siempre desafiándonos y aprendiendo el uno del otro, ha sido clave en todo este proceso. Gracias infinitas por tu apoyo, tu tiempo, tu lealtad y, sobre todo, por

tu ayuda incondicional. No tengo dudas de que esta amistad que hemos forjado nos acompañará siempre.

También quiero acordarme de todas las personas externas con las que he compartido diferentes etapas de este viaje. A quienes conocí y con quienes compartí mis viajes a Grecia y Egipto, en especial a los miembros de los proyectos arqueológicos de Sissi, en Creta, y del MKTP en Luxor, Egipto. Junto a ellos/as, he vivido experiencias inolvidables, tanto en lo profesional como en lo personal. Mención especial a Pau de Soto, por su predisposición a ayudar desde el primer momento durante mi estancia en ICAC, cuando este proyecto apenas comenzaba a tomar forma. A Borja Legarra, con quien me encontré por primera vez durante la campaña de excavación en Creta. Recuerdo que, el día que nos conocimos, me dijo: "Si has sido capaz de venir hasta aquí, te mereces que te ayuden". Y así lo hizo más tarde, durante mi estancia en Londres con él. En esta misma línea, gracias a Tom Brughmans, quien también ha sido una persona clave y con la que tuve una experiencia muy enriquecedora durante mi estancia en UrbNet, en Dinamarca. Su respeto, amabilidad y carisma, junto con su forma de trabajar con eficiencia y profesionalidad, han sido una gran inspiración para mí. *Thank you so much*, Tom. También quiero agradecer a Elisa de Sousa, a quien tuve la suerte de conocer durante mi breve pero grata estancia en Lisboa, y a Vyron Antoniadis, por su apoyo, amabilidad y ayuda desde que lo conocí durante mi estancia en el *National Hellenic Research Foundation* en Atenas. A todos vosotros/as, gracias. Espero que nuestros caminos sigan conectados.

Por último, para cerrar el apartado académico, también quiero agradecer a otras personas que siempre han estado dispuestas a ayudar y con quienes he compartido –y espero seguir compartiendo– este camino. En especial, a

Maurizio Toscano, Fernando Moreno, Olga Palacios, Katarina Mokránová, Juanjo Megías, entre otros. Su apoyo, trabajo y ayuda han sido clave para que todo esto llegara a buen puerto.

A mi familia, porque sin ellos nada de esto tendría sentido. Gracias por entender mis ausencias, mis momentos de estrés y mis eternos "me queda poco", "ahora no puedo", "ya casi termino". A mis padres, por su amor, por enseñarme con el ejemplo lo que es ser buena persona, a no rendirme y por su apoyo incuestionable, incluso aunque muchas veces no entendieran muchas de mis decisiones. Gracias a mi hermana Olga y a Jose, por su cariño, ayuda y por haberme dado unos sobrinos maravillosos, Lucía y Hugo, por todos estos años de ausencia que me han devuelto en forma de amor incondicional. A todos quiero deciros que os quiero y pediros perdón por esos momentos en los que no estuve ahí, incluso estando presente.

A Rebeca, mi pareja, mi compañera, mi mejor amiga, por su amor y paciencia cuando lo único de lo que podía hablarle era del trabajo. Gracias por darme calma y certidumbre en los momentos en los que no era posible. Gracias por respetarme y cuidarme. Gracias por tantas cosas que hemos vivido juntos, compartiendo una misma visión de vida tanto a nivel personal como profesional, y por todo lo que aún nos queda por vivir. Gracias por darme tantas alegrías y por ser mi pilar fundamental. A Max, por su incondicional cariño y compañía, por su nobleza. Perdón por no haber sabido disfrutar del presente contigo; espero que todo esto sea un punto de inflexión. Quiero deciros que os quiero y daros las gracias por acompañarme en este camino.

Y, por último, a mi "otra" familia: Emily, Alma, Claudia, Andrea, San, Lars, Alfredo y Natalia. Mención especial a Alma y Claudia, no solo por su cariño,

sino también por su ayuda para cerrar y maquetar esta tesis doctoral. No sé cómo devolveros toda vuestra ayuda, de verdad. También a Antonio y Barbara. Gracias a todos/as por acogerme como uno más de la familia. A mis amigos/as, que también son familia, a los de siempre: Migue, Desiré, Anabel, Lolo, Jenny, Christian y Alberto, que tanto en los buenos como en los malos momentos de una forma u otra han estado y me han ayudado a crecer. Gracias a todos vosotros/as por no dejar que me aislara del mundo y por recordarme que hay muchas otras cosas. Esto también es un poquito de todos vosotros/as.

CONTENIDOS PUBLICADOS & PRESENTADOS DERIVADOS DE ESTA TESIS DOCTORAL

Parte de los contenidos, procedimientos, código empleado y resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación han sido presentados, publicados o se encuentran en proceso de publicación en las siguientes referencias:

Publicaciones

Laguna-Palma, D., & Moreno-Navarro, F. (*forthcoming*). Modeling Ancient Pathways of Cretan Landscapes: Building Networks and Social Landscapes**.** *Land.*

Laguna-Palma, D., Rodríguez-Rellán, C. & Barruezo-Vaquero, P. (*forthcoming*). Mapping Archaeological Landscapes: site location and human-environment interactions across Northeastern Mediterranean Africa. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies.*

Laguna-Palma, D., & Barruezo-Vaquero, P. (2024). Advancing the LOUD+FAIR Data Principles in Eastern Mediterranean Archaeological Research: Insights from the PERAIA Project. *Advances in Archaeological Practice*, 1–16. https://doi.org/10.1017/aap.2024.16

Laguna-Palma, D., Palacios, O., & Mokránová, K. (2024). Assessing the risks of northeastern African archaeological heritage and their relationship to human–environmental processes: A Bayesian network approach. *World Archaeology, 55*(3), 366–381. https://doi.org/10.1080/00438243.2024.2382138

Laguna-Palma, D., Toscano, M., & Rodríguez-Rellán, C. (2024). The Role of Aerial Prospection for Monitoring and Preserving Cultural Heritage in Northeastern Africa. *Heritage, 7*(2), 652–666. https://doi.org/10.3390/heritage7020032

Laguna-Palma, D. (2024). Enhancing Archaeological Heritage Management: The PERAIA Project's Open Data Database and Web Application. *Journal of Open Humanities Data, 10*(1), 2. https://doi.org/10.5334/johd.158

Laguna-Palma, D. (2023). Los retos del uso de las tecnologías digitales para la (re)construcción de las redes históricas en el contexto del Mar de Libia: El

proyecto PERAIA. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada, 33*, 101–124.

Brughmans, T., & **Laguna-Palma, D.** (2023). Una introducción a la investigación de redes en arqueología: ¿Qué es y por qué la necesitamos? *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada, 33*, 11–32. https://doi.org/10.30827/cpag.v33i0.27790

Laguna-Palma, D., & Barruezo-Vaquero, P. (2023). Landscapes of Movement along the (Pre)historical Libyan Sea: Keys for a Socioecological History. *Open Archaeology, 9*(1), 20220346. https://doi.org/10.1515/opar-2022-0346.

Laguna-Palma, D., Toscano, M., & Rodríguez-Rellán, C. (2023). Building an Integrated Database of North-eastern African Archaeological and Heritage Sites for Mapping Complex Social Landscapes. *Journal of Open Archaeology Data, 11*(5), 1-10. https://doi.org/10.5334/joad.99

Barruezo-Vaquero, P., & **Laguna-Palma, D.** (2022). On the integration of landscape archaeology within the framework of human ecodynamics: Some theoretical considerations. En E. Doğan, M. Pinto Leitão Pereira, O. Antczak, M. Lin, P. Thompson, & C. Alday Mamani (Eds.), *Diversity in Archaeology: Proceedings of the Cambridge Annual Student Archaeology Conference 2020/2021* (pp. 339-358). Archaeopress Publishing Ltd.

Congresos nacionales / internacionales

Laguna-Palma, D. (2024). *Modeling ancient pathways of Cretan landscapes: Building networks and social dynamics*. **GIS in Crete: Archaeological Questions and Computational Answers**, National Hellenic Research Foundation, 30–31 de mayo, Atenas, Grecia. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2023). *An open and interdisciplinary approach to modelling movement along the ancient Libyan Sea*. **Big Historical Data Conference (BHDC)**, 22-25 de noviembre, Jena, Alemania. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2023). *Assessing the risk of the archaeological heritage of Northeastern Africa: A Bayesian network approach*. **EAA Weaving Narratives**, European Association of Archaeologists (EAA), 10 de septiembre, Belfast, Irlanda del Norte. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2023). *Paisajes, redes y sociedad en el contexto del Mar de Libia desde el Bronce Final hasta época romana*. **IV Congreso Nacional de Investigadores en Formación: Fomentando la interdisciplinariedad**

(JIFFI), 21-23 de junio, Universidad de Granada, España [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2023). *Paisajes en movimiento: Modelado de las interacciones humano-medioambiente en el noreste del África mediterránea*. **Workshop: SIG y análisis espacial en arqueología: aplicaciones prácticas y perspectivas futuras**, 10-11 de mayo, Departamento de Prehistoria y Arqueología, Universidad de Granada, España. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2023). *Understanding ancient landscapes in Marmarica: Mobility and networks in harsh environments*. **Workshop Connected Pharaohs: Complex Networks and the Digital Bronze Age**, Austrian Archaeological Institute (OeAI) & Institute for Medieval Research (IMAFO), 20 de mayo, Viena, Austria. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2023). *Mapping human-environment interactions in the Marmarica region (NE-Libya/NW-Egypt): An approach to the uncertainty principle in geospatial analysis*. **CAA 23**, 4-6 de abril, Ámsterdam, Países Bajos. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2022). *Landscapes, networks, and society along the ancient Libyan Sea*. **UrbNet Seminar Series**, Aarhus University, 25 de octubre, Aarhus, Dinamarca. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2022). *Digitising roads and endangered sites along the ancient Libyan Sea*. **Digital Event Classics**, Aarhus University, 7 de septiembre, Aarhus, Dinamarca. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2022). *The challenges of using digital technologies for understanding ancient networks along the Libyan Sea: The PERAIA project experience*. **EAA [Re]integration**, European Association of Archaeologists (EAA), 31 de agosto - 3 de septiembre, Budapest, Hungría. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2022). *Beyond the divide: The unconscious, the digital, and the political in archaeology*. **EAA [Re]integration**, European Association of Archaeologists (EAA), 31 de agosto - 3 de septiembre, Budapest, Hungría. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2022). *Los retos del uso de las tecnologías digitales para el conocimiento de las redes históricas a lo largo del Mar de Libia: La experiencia del proyecto PERAIA*. **III Congreso Nacional de Investigadores en Formación:**

Fomentando la interdisciplinariedad (JIFFI), 22-24 de junio, Universidad de Granada, España. [Presentación póster].

Laguna-Palma, D. (2022). *Re-Mapping Archaeology: El uso de los Sistemas de Información Geográfica y análisis cartográfico como herramienta de investigación arqueo-histórica*. **Construction of Contemporary Imaginaries: Space, Time, Cultures**, 23-24 de mayo, Centro de Estudos em Arquitetura, Urbanismo e Design da Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2022). *Understanding the ancient Marmarica landscapes: Cognitivism and network in harsh environments*. **43rd International Symposium on Archaeometry (ISA)**, 16-20 de mayo, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2022). *The role of aerial prospection for monitoring and preserving the cultural heritage in northeastern Africa: The PERAIA Project experience*. **43rd International Symposium on Archaeometry (ISA)**, 16-20 de mayo, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2021). *On the integration of landscape archaeology within the framework of human ecodynamics*. **Cambridge Annual Archaeology Conference: Diversity in Archaeology**, 14-17 de enero, University of Cambridge, Cambridge, Reino Unido. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2020). *On the importance of the Linked Open Data principles in archaeology: The role of computational ontologies in opening archaeology*. **Keeping Archaeology Together**, 25 de junio, Varsovia, Polonia. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2020). *Human ecodynamics landscapes and digital archaeology: Intricating the Iron Age*. **IARSS Symposium**, 3-4 de junio, University of Manchester, Manchester, Reino Unido. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2020). *Sistemas de Información Geográfica y reconstrucción del pasado: El uso de los mapas como herramienta de narración histórica*. **Simposio Internacional Historia e Imagen: Más allá del texto**, 21-22 de febrero, Universidad de Lisboa y Universidad de Granada, Jerez de la Frontera, Cádiz, España. [Comunicación oral].

Laguna-Palma, D. (2020). *The study of human ecodynamics as an applied paradigm to archaeological research*. **TAG Ibérico**, 13-15 de febrero, Lisboa, Portugal. [Comunicación oral].

ÍNDICE

RESUMEN XXIX

ABSTRACT XXXI

ABREVIATURAS XXXIII

LISTADO DE FIGURAS XXXVII

LISTADO DE TABLAS XLIX

CHAPTER I: AN INTRODUCTORY JOURNEY 2

1.1 CONTRIBUTION & ORIGINALITY OF THE PROJECT 4
1.1.1 What is PERAIA 4
1.1.2 Why this Project? 6
1.1.3 Aims, Research Questions, and Hypothesis 11

1.2 GEOGRAPHICAL FRAMEWORK: BETWEEN MESOGEAN & SAHARA INFLUENCE 18
1.2.1 Defining the Study Area: Boundaries and Landscapes 18
1.2.2 Physical Geography and Ecological Context 21
1.2.3 Human and Environment Impacts 29

1.3 HISTORICAL SETTING: INTEGRATING PREHISTORY & HISTORY IN A LONG-TERM PERSPECTIVE 32
1.3.1 Contextual Approach 32
1.3.2 Historical and Archaeological Significance 36
1.3.3 State of Art 40

1.4 STRUCTURE & SUMMARY OF CHAPTERS 47

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO – CLAVES PARA UNA HISTORIA SOCIOECOLÓGICA 54

2.1 PAISAJES, INTERACCIÓN, COMPLEJIDAD 56
2.1.1 Una Arqueología del Paisaje 57

Bases conceptuales y definición de paisaje 57
Sobre el concepto de lugar y hábitat (*Heterotopía*) 62
Definición de "sitio" arqueológico 66
2.1.2 Una Arqueología de la Interacción 70
Interacción 70
Redes 74
Escala 79
2.1.3 Una Arqueología de la Complejidad 81
Complejidad Social 81
Sistemas Complejos 84
El pensamiento de Sistemas Complejos 86

2.2 EL PAPEL DE LOS FACTORES SOCIOECOLÓGICOS 89
2.2.1 Ecodinámicas Humanas y Ecología Histórica 89
2.2.2 Explorando los principios fundamentales de la "EH": relaciones enredadas 90
Agencia mutua 91
No linealidad 93
Heterarquía 94
Multiescalar: perspectiva a largo plazo y a gran escala (distribuida) 95

2.3 CONSIDERACIONES EPISTEMOLÓGICAS & ÉTICAS: UNA BREVE REFLEXIÓN SOBRE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN 97

2.4 DE LA TEORÍA A LA IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA 102
2.4.1 Diseño e implementación del proyecto 102
2.4.2 Cómo estas aproximaciones nos permiten estudiar la complejidad 104

CAPÍTULO III: INTERPRETANDO LA TOPOGRAFÍA ARQUEOLÓGICA 110

3.1 MAPEO & CARTOGRAFÍA ARQUEOLÓGICA 112
3.1.1 La prospección arqueológica 112
3.1.2 Estrategias adaptadas a la "revolución" tecnológica 115
3.1.3 Teledetección y registro del patrimonio 120

3.2 APLICACIONES TÉCNICAS & MODELIZACIÓN DIGITAL 126
3.2.1 Fuentes, Recursos y Datos 126
3.2.2 Arquitectura de Bases de Datos 135

Modelado de datos: personalización VS estandarización ... 135
Exploración de datos: variables medioambientales y arqueológicas ... 139
Escalas espacio-temporales ... 144
Gestión de la incertidumbre y datos incompletos ... 148
Tratamiento de datos e información (Open Data) ... 151
3.2.3 *Gazetteer* de sitios arqueológicos ... 153
Estructura y formato de los registros ... 153
Evaluación de riesgos ... 155
Escalas de validación ... 158
3.2.4 *Gazetteer* de rutas históricas ... 161
Estructura y formato de los registros ... 161
Tipología de rutas ... 163
Niveles de conocimiento ... 165

3.3 MÉTODOS & TÉCNICAS DE PROSPECCIÓN AÉREA REMOTA ... 167
3.3.1 Pre-procesamiento de datos ... 168
3.3.2 Aplicaciones técnicas SIG ... 170
3.3.3 Métodos de georreferenciación ... 173
3.3.4 Mapeo aéreo mediante fotointerpretación ... 176

3.4 ESTUDIOS DE CASO ... 179
3.4.1 Creta (Grecia) ... 180
3.4.2 Marmárica (NE-Libia/NO-Egipto) ... 201

CAPÍTULO IV: LA COMPLEJIDAD ESPACIAL DEL PAISAJE ARQUEOLÓGICO ... 220

4.1 MODELOS COMPUTACIONALES & CUANTITATIVOS EN ARQUEOLOGÍA ... 222
4.1.1 Modelización de Sistemas Complejos ... 222
4.1.2 Sobre el concepto de "cuantificación" ... 224
4.1.3 Del Análisis Espacial a las aplicaciones de Aprendizaje Automático ... 227

4.2 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ... 233
4.2.1 Patrones de distribución de los sitios arqueológicos ... 233
Análisis de Densidad ... 234
Test de Aleatoriedad Espacial Completa ... 236
Test de Hopkins-Skellam ... 238
Análisis de Percolación ... 239

4.2.2 Correlaciones espaciales entre factores humanos y no humanos 242
Test de Kolmogorov-Smirnov 247
Test de Berman 248
Receiver Operating Characteristic Curve (ROC) 249
Area Under the Curve (AUC) 250

4.3 MODELO PREDICTIVO 251
4.3.1 Redes Bayesianas 251
4.3.2 Pre-procesamiento de Datos 256
4.3.3 Construcción del Modelo 259

4.4 ESTUDIOS DE CASO 264
4.4.1 Creta (Grecia) 264
4.4.2 Marmárica (NE-Libia/NO-Egipto) 285

CAPÍTULO V: PAISAJES EN MOVIMIENTO – (RE)CONSTRUYENDO REDES & DINÁMICAS SOCIALES 322

5.1 INVESTIGACIÓN DE REDES EN ARQUEOLOGÍA 324
5.1.1 Movilidad, Rutas y Redes 324
5.1.2 Conceptualización de "redes espaciales" 328
5.1.3 Desde lo local a lo global: una aproximación multiescalar 332

5.2 TÉCNICAS DE (RE)CONSTRUCCIÓN DE REDES 334
5.2.1 Coste, esfuerzo y desplazamiento 335
5.2.2 Focal Mobility Network (FMN) 344
5.2.3 Gestión de la incertidumbre en el análisis geoespacial 351

5.3 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE REDES & MODELIZACIÓN TEÓRICA 360
5.3.1 Medidas de centralidad 363
Grado de centralidad (Degree centrality) 367
Grado de cercanía (Closeness centrality) 368
Grado de intermediación (Betweenness centrality) 369

5.3.2 Modelos de redes espaciales 370
K-Nearest-Neighbors Networks (K-NN) 372
Redes de Distancia Máxima (MDN) 373

Relative Neighborhood Networks, Gabriel Graphs y Beta Skeletons 374

5.4 ESTUDIOS DE CASO 376

5.4.1 Creta (Grecia) 377
5.4.2 Marmárica (NE-Libia/NO-Egipto) 446
5.4.3 Mar de Libia: un marco multiescalar 520

CAPÍTULO VI: LA IMPORTANCIA DE LA "APERTURA" EN LA INVESTIGACIÓN ARQUEOLÓGICA 534

6.1 CIENCIA ABIERTA (OPEN SCIENCE) 536

6.2 ARQUEOLOGÍA ABIERTA: DEFINICIONES & CONTEXTO 539
6.2.1 Sobre el concepto de "apertura" 539
6.2.2 ¿Qué son la literatura gris y los datos heredados? 542
6.2.3 Proyectos que aplican enfoques digitales a la gestión de datos 547

6.3 DATOS & METODOLOGÍAS ABIERTAS EN ARQUEOLOGÍA 550
6.3.1 Open Data *versus* Open Source 550
6.3.2 Principios FAIR y LOUD 556
6.3.3 Accesibilidad, transparencia y ética en la investigación 562

6.4 UN EJERCICIO DE PRÁCTICAS FAIR+LOUD EN LA INVESTIGACIÓN ARQUEOLÓGICA MEDITERRÁNEA 569

CHAPTER VII: ORDERING DATA, NARRATION IN PLAY - LANDSCAPES, NETWORKS & SOCIETY ALONG THE ANCIENT LIBYAN SEA 576

7.1 RATIONALE BEHIND THE DATA(SETS): WHAT KNOWLEDGE DOES IT REPRESENT? 578

7.2 THE CRETAN ARCHAEOLOGICAL LANDSCAPE 584
7.2.1 Communities in Context: Diachronic Patterns and Regional Trends 584
7.2.2 Mobility and Networks: Traversing Scales 599

7.2.3 Societies in Transition 690

7.3 MARMARICA IN ITS AFRICAN CONTEXT 618
7.3.1 Making Practices Visible: Sites and Regional Dynamics 618
7.3.2 Desert Networks: Relations Between Mobile and Settled Groups 630
7.3.3 Reconstituting Societies in "Marginal" Spaces 642

7.4 THE ANCIENT LIBYAN SEA - NETWORKS OF INTERACTION 652
7.4.1 Micro – networks: Proximate Interactions 661
7.4.2 Meso – networks: Communities of Practice 662
7.4.3 Macro – networks: Interregional Interactions 664

CHAPTER VIII: CONCLUDING REMARKS *&* FUTURE OF RESEARCH 668

BIBLIOGRAFÍA 690

RESUMEN

La presente tesis doctoral explora las dinámicas socioecológicas que se desarrollaron en torno al antiguo mar de Libia, con un enfoque específico en las regiones de Creta (Egeo) y Marmárica (noreste del África mediterránea) durante el periodo comprendido desde el Bronce Final hasta época romana (*ca.* 1400 a.C. – 300 d.C.). Basado en la arqueología del paisaje e integrando principios de las ecodinámicas humanas, la ecología histórica y el pensamiento en red, este estudio examina las interrelaciones coevolutivas entre las comunidades humanas y su entorno, a través de una perspectiva diacrónica y multiescalar. Al situar estos procesos a largo plazo (*longue durée)* y considerar múltiples escalas de análisis, esta investigación tiene el potencial de revelar cómo los factores no humanos (geografía, condiciones climáticas o ecológicas generales) y humanos (estructuras económicas, políticas o culturales) influyeron de manera continua en la configuración del paisaje, las redes de interacción y la complejidad social en estas regiones interconectadas.

Para alcanzar este objetivo, la investigación aborda tres dimensiones clave: (i) el acoplamiento entre unidades sociales y su entorno, analizado mediante indicadores arqueológicos y medioambientales, con el propósito de evaluar los cambios diacrónicos en la distribución, densidad y organización de los asentamientos, lo que permite arrojar luz sobre las estrategias adaptativas, la resiliencia y la vulnerabilidad de estos sistemas; (ii) la relevancia de las redes de movilidad e interacción, examinando cómo los intercambios multiescalares —locales, regionales e interregionales— moldearon las trayectorias socioecológicas e históricas; y (iii) la adopción de una perspectiva de sistemas complejos, que permite analizar las interacciones entre escala y complejidad en la configuración y evolución de estas sociedades.

Metodológicamente, este estudio aprovecha el potencial combinado de las tecnologías digitales y los enfoques computacionales, adoptando un enfoque que integra varios niveles de análisis. En primer lugar, se emplean técnicas de prospección aérea remota para recopilar y estructurar diversos conjuntos de datos, integrando evidencias de distintas fuentes y naturaleza. En segundo lugar, la modelización computacional y cuantitativa —incluidos el análisis espacial y las técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*)— permite la identificación de patrones en la distribución de los sitios arqueológicos y establecer correlaciones entre factores humanos y no humanos. En tercer lugar, se aplican análisis basados en SIG (Sistemas de Información Geográfica) y técnicas de ciencia de redes para reconstruir patrones históricos de movilidad e interacción. Una contribución clave de esta investigación radica en el desarrollo y estructuración de diversos modelos integrados de datos, los cuales abordan cuestiones relacionadas con la incorporación de variables geográficas, ambientales y arqueológicas, la gestión de la incertidumbre y los datos incompletos, las evaluaciones de riesgo y la importancia de la "apertura" de los datos.

A modo de conclusión, este estudio destaca la multiplicidad de factores y escalas implicados en tales procesos, así como las complejidades espaciales que estructuran las interacciones tanto dentro como entre las regiones analizadas. Esta perspectiva permite profundizar en la comprensión de los patrones de asentamiento y conectividad, revelando cómo las interacciones multiescalares moldearon las trayectorias de comunidades continentales e insulares. Estas dinámicas reflejan contextos mediterráneos y norteafricanos más amplios e interconectados, subrayando la importancia de las continuas interacciones entre las comunidades humanas y su entorno en la configuración de complejos paisajes sociales.

ABSTRACT

This dissertation investigates the socioecological dynamics that unfolded along the ancient Libyan Sea from the Late Bronze Age to the Roman period (*ca.* 1400 BCE – 300 CE), focusing on the regions of Crete (Aegean) and Marmarica (northeastern Mediterranean Africa). Grounded in landscape archaeology and integrating principles from human ecodynamics, historical ecology, and network thinking, this study examines co-evolutionary human-environment interactions through a diachronic and multi-scalar approach. By analyzing these processes from a long-term perspective (*longue durée*) and employing multiple scales of analysis, this research aims to uncover how non-human (geographical, climatic, or general ecological conditions) and human factors (economic, political, and cultural structures) continuously shaped landscapes, interaction networks, and social complexity across these interconnected regions.

Building on this, the study addresses three critical dimensions: (i) the coupling of social units and their environments, which is analyzed through archaeological and environmental *proxies* to assess diachronic shifts in site distribution, density, and organization, thereby providing insights into adaptive strategies, resilience, and system vulnerabilities; (ii) the significance of mobility and interaction networks, examining how multi-scalar exchanges —local, regional, and interregional— influenced socioecological and historical trajectories; and (iii) the adoption of a complex systems perspective, enabling the examination of interactions between scale and complexity in the formation and evolution of these societies.

Methodologically, the research leverages the combined potential of digital technologies and computational approaches within an integrative, multilevel analytical framework. First, remote aerial survey techniques are utilized to collect and structure diverse datasets, incorporating evidence from various sources and different natures. Second, computational and quantitative modeling —including spatial analysis and machine learning techniques— is applied to identify patterns in site distributions and establish correlations between human and non-human factors. Third, GIS-based analyses and network science techniques are used to reconstruct historical patterns of mobility and sociospatial interactions. A key contribution of this work lies in the development, structuring, and organization of diverse datasets, addressing challenges related to the incorporation of environmental and archaeological variables, managing uncertainty and incomplete data, conducting risk assessments, and fostering open data practices.

Overall, this study underscores the multiplicity of factors and scales involved in shaping these processes, as well as the spatial complexities that govern interactions within and between these regions. This approach facilitates a more comprehensive understanding of settlement patterns and connectivity, illustrating how multi-scalar interactions influenced the trajectories of both continental and insular communities. These dynamics reflect broader contexts of interconnections across the Mediterranean and North Africa, highlighting the critical role of human-environment interactions in the configuration of complex social landscapes.

ABREVIATURAS

ABM	Agent Based Modeling
ACS	Accumulated Cost Surface
ADS	Archaeology Data Service
ANB	Augmented Naïve Bayes
ANT	Actor Network Theory
ARC	Archaic
AREA	ARchives of European Archaeology
ARENA	Archaeological Records of Europe Network Access
ARIADNE	Advanced Research Infrastructure for Archaeological Dataset Networking in Europe
AUC	Area Under the Curve
CARE	Collective Benefit, Authority to Control, Responsibility, and Ethics
CAS	Complex Adaptative Systems
CASA	Centre for Advanced Spatial Analysis
CCA	Creative Commons Attributions
CCP	Cumulative Cost Path
CD	Cost Distance
CGIS	Canada Geographic Information System
CLA	Classic
CLMS	Copernicus Land Monitoring Service
CORINE	Coordination of Information on the Environment
CSR	Complete Spatial Randomness
CSV	Comma Separated Values
DAGs	Directed Acyclic Graphs
DANS	Data Archiving and Networked Services
DAPPER	Digital Archiving and Preservation for Research
DEM	Digital Elevation Model
DOI	Digital Object Identifier
DONOP	Red de Observación Distribuida del Pasado
EAMENA	Endangered Archaeology in the Middle East and North Africa
EH	Ecodinámicas Humanas / Ecología Histórica
EIA	Early Iron Age
ERC	European Research Council
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FA	Flow Accumulation

FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable
FCW	Free Cultural Works
FD	Flow Direction
FETE	From Everywhere to Everywhere
FMN	Focal Mobility Network
FPR	Tasa de Falsos Positivos
GAEZ	Global Agro-Ecological Zones
GCPs	Ground Control Points
GG	Gabriel Graphs
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
GRASS	Geographic Resources Analysis Support System
HC	Hill-Climbing
HE	Human Ecodynamics / Historical Ecology
HEL	Hellenistic
IA	Inteligencia Artifical
IMGRID	Interactive Manipulation Grid
K-NN	K-Nearest-Neighbors Networks
K-S	Kolmogorov-Smirnov
KDE	Kernel Density Estimation
LBA	Late Bronze Age
LCP	Least Cost Path
LEAP	Linking Electronic Archives and Publications
LiDAR	Light Detection and Ranging / Laser Imaging Detection and Ranging
LM	Late Minoan
LOD	Linked Open Data
LOUD	Linked Open Usable Data
LZW	Lempel-Ziv-Welch
MADO	Modelo de Acumulación de Desplazamiento Óptimo
MAEMASAM	Mapping Africa's Endangered Archaeological Sites and Monuments
MAHSA	Mapping Archaeological Heritage in South Asia
MAPHSA	Mapping the Archaeological Pre-Columbian Heritage of South America
MAREA	Maritime Endangered Archaeology
MDN	Maximum Distance Networks
MDT	Modelo Digital de Elevación del Terreno
MIDE	Método de Información de Excursiones
MIMO	Map in-Map out

NA	Not Available
NB	Naïve Bayes
OASIS	Online Access to the Index of Archaeological Investigations
OF	Open Format
OL	Open License
PDF	Portable Document Format
PPA	Point Proximal Analysis
RAE	Real Academia Española
RAF	Royal Air Force
RDF	Resource Description Framework
RE	Readable
RNN	Relative Neighborhood Networks
ROC	Receiver Operating Characteristics
ROM	Roman
sDNA	Spatial Design Network Analysis
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SNA	Social Network Analysis
SRC	Sistema de Referencia de Coordenadas
SRE	Sistema de Referencia Espacial
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SYMAP	Synagraphic Mapping Technique
tDAR	The Digital Archaeological Record
TIFF	Tagged Image File Format
TIG	Tecnologías de Información Geográfica
TPR	Tasa de Verdaderos Positivos
UCL	University College London
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
URI	Uniform Resource Identifier
UTM	Universal Transverse Mercator
WCS	Web Coverage Service
WFS	Web Feature Service
WGS	World Geodetic System
WMS	Web Map Service
WWW	World Wide Web

LISTADO DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figure 1.1. Satellite imagery showing the sociospatial area of interactions between Crete and Marmarica along the Libyan Sea 19

CAPÍTULO III

Figura 3.1. Principales aplicaciones de los SIG 117
Figura 3.2. Cartel promocional del Cuartel General de la División Aérea del Ejército de EE. UU., 1942 129
Figura 3.3. Ejemplos de diferentes capas de datos e información recopilados que cubren el área de Marsa Matruh (NO-Egipto) 130
Figura 3.4. Portada folleto informativo producido por el régimen nazi que contiene información arqueológica de Creta 131
Figura 3.5. Modelo conceptual del proceso de recopilación, evaluación y difusión de datos 138
Figura 3.6. Ortomosaico de fotografías aéreas tomadas por la *Royal Air Force* (1938) (NO-Egipto) 169
Figura 3.7a. Unidades biogeográficas de componen la isla de Creta 171
Figura 3.7b. Zonas ecológicas que componen la región de Marmárica (NE-Libia / NO-Egipto) 172
Figura 3.8. Límite septentrional entre Marmárica occidental y oriental 174
Figura 3.9. Diversas capas de datos e información cartográfica georreferenciadas en el marco de esta investigación 176

Figura 3.10. Muestra de sitios documentados en Marmárica 177
Figura 3.11. Representación de las estructuras de movilidad en Marmárica 178
Figura 3.12. Representación general de la isla de Creta con ejemplos de imágenes aéreas y satélite de distintas fuentes y series temporales 181
Figura 3.13. Principales áreas de investigación arqueológica y los proyectos de prospección que han realizado estudios de campo en Creta 182
Figura 3.14. Trabajos de prospección realizados en torno a la desembocadura del río Selinari (Creta, Grecia) 183
Figura 3.15. Vista general del territorio prospectado, que abarca todo el valle hasta la colina de Kephali y sus alrededores (Creta, Grecia) 184
Figura 3.16. Vista panorámica de la fértil llanura de Mesará, con las montañas Asterousia al fondo, situada en el sur de Creta central 185
Figura 3.17. Panorámica de la bahía de Balos en la región de Khania (oeste de Creta) 186
Figura 3.18. Representación de la totalidad de los sitios arqueológicos identificados y registrados en el marco de esta investigación en Creta 188
Figura 3.19. Ejemplos de sitios arqueológicos documentados durante el proceso de mapeo y validados en campo 189
Figura 3.20. Ejemplos de sitios arqueológicos documentados durante el proceso de mapeo y validados en campo 190
Figura 3.21. Ejemplos de sitios arqueológicos documentados durante el proceso de mapeo y validados en campo 191
Figura 3.22. Ejemplos de sitios arqueológicos clasificados según el grado de precisión y validación 193
Figura 3.23. Vista de la salida desde el desfiladero de Selinari (Creta) 194
Figura 3.24. Representación completa de las rutas identificadas y documentadas en Creta 195
Figura 3.25. Gráfico de densidad de las rutas categorizadas por tipología y valores de longitud escalados 196

Figura 3.26a. Características físicas del relieve y temperatura media anual en la isla de Creta 198

Figura 3.26b. Cobertura vegetal del terreno de la isla de Creta 199

Figura 3.26c. Áreas de desarrollo urbano y grandes extensiones de terrenos agrícolas en Creta 200

Figura 3.27. Representación de la totalidad de los sitios arqueológicos identificados y registrados en el marco de esta investigación en Marmárica 203

Figura 3.28. Cisterna de Abar Abu Imama, cerca de Dardouma en la llanura Premarmárica 204

Figura 3.29. Diferentes restos materiales cerca de la cisterna de Bir Abu Mukhayat y Abar el Kanayis (Marmárica oriental) 205

Figura 3.30. Diferentes estructuras construidas documentadas en Marmárica 206

Figura 3.31. Características bioclimáticas de Marmárica 207

Figura 3.32. Totalidad de los sitios arqueológicos identificados y registrados en el marco de esta investigación en Marmárica 209

Figura 3.33. Sitios arqueológicos clasificados según el grado de precisión y validación proporcionado por las fuentes 210

Figura 3.34. Huellas de tránsito cerca de Bir el Qatir (NO-Egipto) 211

Figura 3.35. Rutas identificadas y registradas durante el marco de esta investigación en Marmárica 212

Figura 3.36. Distribución de las longitudes de las rutas según su tipología; y valores de longitud de las rutas escalados 213

Figura 3.37a. Representación topográfica de Marmárica y temperatura media anual 215

Figura 3.37b. Relación geológica y sedimentaria de Marmárica; y áreas que han experimentado un desarrollo urbano significativo 216

Figura 3.37c. Cobertura del terreno en la región de Marmárica 217

CAPÍTULO IV

Figura 4.1. Estimación de la densidad de Kernel (KDE) aplicado a una distribución de puntos simulada 235
Figura 4.2. Tipos de distribución de puntos: (a) aleatoria; (b) regular; (c) agrupada; y cómo cada una de esas distribuciones se manifiesta en la función *K* de Ripley 237
Figura 4.3. Análisis de percolación en un conjunto de puntos simulados 241
Figura 4.4. Variables relacionadas con el tipo de suelo, las condiciones ambientales y la cercanía a estructuras contemporáneas 257
Figura 4.5. Estimación de la densidad de Kernel (KDE) sobre la distribución de los sitios documentados en la isla de Creta 266
Figura 4.6. Representación gráfica de la distribución de los sitios documentados en Creta mediante la función *K* de Ripley 268
Figura 4.7. Evolución progresiva en la estructura de los *clusters* (agrupaciones*)* a medida que aumenta el radio analizado en el caso de Creta 272
Figura 4.8. Relación entre el tamaño máximo de los *clusters* y el radio en kilómetros 273
Figura 4.9. Costes de desplazamiento (en horas) desde los asentamientos a zonas productivas, rutas históricas y rutas simuladas (FMN) 278
Figura 4.10. Distribución de densidad y costes de desplazamiento de las zonas productivas, rutas históricas y rutas simuladas (FMN) 279
Figura 4.11. Gráficos ROC que muestran la capacidad discriminatoria de distintas variables en la predicción de la ubicación de antiguos asentamientos en Creta 284
Figura 4.12. Estimación de la densidad de Kernel (KDE) sobre la distribución de los sitios documentados en la región de Marmárica 287
Figura 4.13. Distribución de los sitios documentados en Marmárica mediante la función *K* de Ripley 289
Figura 4.14. Agrupaciones o *clusters* de asentamientos codificados por colores a diferentes radios (km) en Marmárica 294

Figura 4.15. Relación entre el tamaño de los *clusters* y el radio analizado para los asentamientos documentados en Marmárica 295
Figura 4.16. Costes de desplazamiento (en horas) calculados a partir de variables específicas 298
Figura 4.17. Intensidad de los asentamientos en función de los costes de desplazamiento desde fuentes de agua, áreas productivas, rutas históricas y corredores de movilidad 299
Figura 4.18. Curvas ROC que muestran la capacidad discriminatoria de las variables consideradas en este análisis 305
Figura 4.19. Distribución de los sitios documentados en Marmárica oriental y occidental, con cada categoría representada en porcentaje según la escala de probabilidad de riesgo 308
Figura 4.20. Mapa de la región de Marmárica en el que se muestran los sitios documentados en el marco de esta investigación y representados según su nivel de riesgo 309
Figura 4.21. Distribución de los tipos de sitios arqueológicos registrados en las distintas zonas geográficas, categorizados según su supervivencia; y relación entre las diferentes tipologías 316
Figura 4.22. Modelo de red bayesiana que muestra la probabilidad de supervivencia en función de las condiciones del paisaje en Marmárica 319

CAPÍTULO V

Figura 5.1. Proceso de obtención de un mapa de fricción que represente el coste al desplazamiento 336
Figura 5.2. Distintas etapas o fases necesarias para modelar las rutas o corredores de movilidad históricos 346
Figura 5.3. Resultados tras aplicar la secuencia de operaciones del FMN 348

Figura 5.4. Secuencia de operaciones del FMN automatizada en la herramienta *ModelBuilder* en ArcGIS (v.10.5) 349

Figura 5.5. Representación gráfica de una función continua y pseudo parabólica 357

Figura 5.6. Proceso de integración de los valores de acumulación de flujo asociados a cada segmento de la red 362

Figura 5.7. Representación de la red de movilidad de la isla de Creta 366

Figura 5.8. Representaciones gráficas que muestran gráficamente la definición de las regiones de influencia para los modelos de vecindad relativa (*Relative Neighborhood Networks,* RNN) y Grafo de Gabriel (*Gabriel Graphs*, GG) 374

Figura 5.9. Totalidad de la isla de Creta representada mediante un modelo digital de elevación, junto con la red hidrográfica 378

Figura 5.10. Procedimiento para el cálculo de la pendiente y la asignación de un coste gradual al cruce de la red hidrográfica 380

Figura 5.11. Representación de diferentes funciones de desplazamiento 381

Figura 5.12. Representación de la malla o *grid* de puntos cubriendo uniformemente la totalidad de Creta 383

Figura 5.13. Secuencia de operaciones del FMN 385

Figura 5.14. Resultados finales tras aplicar un procedimiento de reclasificación estadística (desviación estándar ¼) 387

Figura 5.15. Representación gradual de los corredores con mayor acumulación de flujo, indicando las áreas con mayor potencial de circulación 388

Figura 5.16. Representación de la red de movilidad de la isla de Creta, con nodos de unión el inicio y final de cada tramo de ruta, junto con la integración de los valores de acumulación asociados a cada segmento 394

Figura 5.17. Análisis del grado de centralidad (*degree centrality*) con radios de 20 km y 50 km 395

Figura 5.18. Análisis del grado de intermediación (*betweenness centrality*) y grado de cercanía (*closeness centrality*) aplicados a un radio de 20 km 396

Figura 5.19. Los nodos aparecen representados según su grado de intermediación (*betweenness centrality*), y su grado de cercanía (*closeness centrality)* 398

Figura 5.20. Los enlaces aparecen representados según su grado de intermediación (*betweenness centrality*), y su grado de cercanía (*closeness centrality)* 399

Figura 5.21. Representación de la red de movilidad de la isla de Creta con los nodos liberados de su posición geográfica 400

Figura 5.22. Modelo K-NN aplicado a los asentamientos del Bronce Final 407

Figura 5.23. Modelo K-NN aplicado a los asentamientos del inicio de la Edad del Hierro 408

Figura 5.24. Modelo K-NN aplicado a los asentamientos del Periodo Arcaico 409

Figura 5.25. Modelo K-NN aplicado a los asentamientos del Periodo Clásico 410

Figura 5.26. Modelo K-NN aplicado a los asentamientos del Periodo Helenístico .. 411

Figura 5.27. Modelo K-NN aplicado a los asentamientos del Periodo Romano 412

Figura 5.28. Modelo MDN aplicado a los asentamientos del Bronce Final 419

Figura 5.29. Modelo MDN aplicado a los asentamientos del inicio de la Edad del Hierro 420

Figura 5.30. Modelo MDN aplicado a los asentamientos del Periodo Arcaico 421

Figura 5.31. Modelo MDN aplicado a los asentamientos del Periodo Clásico 422

Figura 5.32. Modelo MDN aplicado a los asentamientos del Periodo Helenístio 423

Figura 5.33. Modelo MDN aplicado a los asentamientos del Periodo Romano 424

Figura 5.34. Modelo RNN para el Bronce Final, inicio de la Edad del Hierro y periodo Arcaico 431

Figura 5.35. Modelo RNN para el periodo Clásico, Helenístico y Romano 432

Figura 5.36. Modelo GG con distintos niveles de β aplicados al Bronce Final 439

Figura 5.37. Modelo GG con distintos niveles de β aplicados al inicio de la Edad del Hierro 440

Figura 5.38. Modelo GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Arcaico 441

Figura 5.39. Modelo GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Clásico 442

Figura 5.40. Modelo GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Helenístico 443

Figura 5.41. Modelo GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Romano ... 444
Figura 5.42. Delimitación de las distintas zonas ecológicas que conforman la región de Marmárica ... 448
Figura 5.43. Red completa de *wadis* presente en la región de Marmárica ... 450
Figura 5.44. Resultados de la red hidrográfica de Marmárica tras aplicar un doble factor de coste o fricción gradual al desplazamiento fuera de las zonas de influencia, además de asignar un coste específico al cruce en las áreas con mayor acumulación de flujo ... 453
Figura 5.45. Representación de la superficie de coste o mapa de fricción final ... 454
Figura 5.46. Malla o *grid* de puntos separados a una distancia uniforme de 10 km entre sí, cubriendo la totalidad del área a analizar ... 456
Figura 5.47. Resultados preliminares tras la aplicación del método FMN ... 457
Figura 5.48. Representación de dos problemáticas comunes en análisis geoespacial: (i) el "efecto borde," y (ii) la alta densidad de rutas en las zonas centrales, debido a un mayor grado de intermediación ... 459
Figura 5.49. Resultados tras aplicar un método de reclasificación estadística, que permite normalizar los datos para reducir la pérdida de información hacia los límites del área de estudio y "refinar" la red en las zonas centrales ... 463
Figura 5.50. Red de movilidad de la región de Marmárica, incluyendo la creación de nodos en los puntos de inicio y final de cada tramo de ruta y atributos asociados .. 468
Figura 5.51. Análisis del grado de centralidad (*degree centrality*) con radios de 20 km (arriba) y 50 km ... 470
Figura 5.52. Análisis del grado de intermediación (*betweenness centrality*) y grado de cercanía (*closeness centrality*) aplicados a un radio de 20 km ... 471
Figura 5.53. Representación de la red de movilidad en la región de Marmárica mediante nodos y enlaces ... 473
Figura 5.54. Representación de la red de movilidad en la región de Marmárica, centrado en el análisis de las conexiones (enlaces) ... 474

Figura 5.55. Representación de la red de movilidad de la región de Marmárica, con los nodos liberados de su posición geográfica 475
Figura 5.56. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del Bronce Final ... 481
Figura 5.57. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del inicio de la Edad del Hierro 482
Figura 5.58. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del periodo Arcaico 483
Figura 5.59. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del periodo Clásico 484
Figura 5.60. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del periodo Helenístico 485
Figura 5.61. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del periodo Romano 486
Figura 5.62. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del Bronce Final ... 493
Figura 5.63. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del inicio de la Edad del Hierro 494
Figura 5.64. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del periodo Arcaico 495
Figura 5.65. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del periodo Clásico 496
Figura 5.66. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del periodo Helenístico 497
Figura 5.67. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del periodo Romano 498
Figura 5.68. Modelo de red RNN para el Bronce Final, inicio de la Edad del Hierro y Arcaico 505
Figura 5.69. Modelo de red RNN para el periodo Clásico, Helenístico y Romano 506
Figura 5.70. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al Bronce Final 513

Figura 5.71. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al inicio de la Edad del Hierro 514

Figura 5.72. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Arcaico 515

Figura 5.73. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Clásico 516

Figura 5.74. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Helenístico 517

Figura 5.75. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Romano 518

Figura 5.76. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al Bronce Final, inicio de la Edad del Hierro y el periodo Arcaico 529

Figura 5.77. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Clásico, Helenístico y Romano …..... 530

CAPÍTULO VI

Figura 6.1. Modelo de las 7 esferas de datos 559

Figura 6.2. Interfaz del servicio web que permite libre acceso a consulta y descarga de los datos, junto con la visualización del mapa interactivo 565

Figura 6.3. Publicaciones en acceso abierto vinculadas a esta investigación y base de datos de los sitios arqueológicos publicados en Zenodo 567

CAPÍTULO VII

Figure 7.1. Interconnected stages of knowledge production in scientific research ... 580

Figure 7.2. Map of western Crete (Khania) boundaries, illustrating the locations of ancient sites referenced in the text ... 588

Figure 7.3. Map of central Crete (Rethymno and Heraklion) boundaries, illustrating the locations of ancient sites referenced in the text ... 590

Figure 7.4. Map of eastern Crete (Lasithi) boundaries, illustrating the locations of ancient sites referenced in the text ... 592

Figure 7.5. Map of western Marmarica (NE-Libya) boundaries, illustrating the locations of ancient sites referenced in the text ... 623

Figure 7.6. Map of eastern Marmarica (NW-Egypt) boundaries, illustrating the locations of ancient sites referenced in the text ... 624

Figure 7.7. Map of the Libyan Sea illustrating the locations of the main ancient harbours of Crete and Marmarica ... 655

Figure 7.8. Map of the Libyan Sea illustrating the main maritime routes, including coastal navigation (cabotage) and direct point-to-point passages between Crete and Marmarica ... 656

LISTADO DE TABLAS

CAPÍTULO I

Table 1.1. Chronological scheme of historical periods covered by this study 33

Table 1.2. Dissertation scheme, representing the correlation between objectives, research questions, and corresponding chapters 51

CAPÍTULO III

Tabla 3.1. Fuentes de datos e imágenes utilizadas en el contexto de este estudio 133

Tabla 3.2. Escalas espacio-temporales de la investigación 146

Tabla 3.3. La variable "*Accuracy*" (Precisión) se refiere a la evaluación de la proximidad entre la ubicación geográfica real de los sitios y la posición registrada en el marco de esta investigación 150

Tabla 3.4. La variable "*Validation*" (Validación) se basa en el nivel de confianza atribuido a las fuentes utilizadas para contrastar y recopilar información sobre los sitios arqueológicos 150

Tabla 3.5. Estructura y formato de los registros de los sitios arqueológicos 154

Tabla 3.6. Marco de evaluación de riesgos 157

Tabla 3.7a. Ejemplo de un sitio arqueológico junto con las variables *Accuracy* y *Validation* 159

Tabla 3.7b. Metadatos que detallan las escalas de validación, abarcando campos para la precisión en la digitalización y el nivel de confianza asociado a las fuentes 160

Tabla 3.8. Estructura y formato de los registros de rutas históricas 162

Tabla 3.9a. Ejemplo de ruta arqueológica junto con las variables "*Knowledge*" y "*Cod_Know*" 166

Tabla 3.9b. Metadatos que detallan la escala de validación, mostrando la correlación entre el nivel de conocimiento basado en las fuentes y un código asociado a cada categoría 167

Tabla 3.10. Principales métodos de georreferenciación utilizados en el contexto de esta investigación 175

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1. Variables empleadas en el modelo y divididas en cuatro categorías relacionadas con la descripción del lugar, la ubicación, el clima y las características del suelo 258

Tabla 4.2. Resultados de las pruebas estadísticas (K-S, Berman Z1 y Z2, y análisis de ROC-AUC) para evaluar la influencia de distintas variables en la distribución de antiguos asentamientos en Creta 283

Tabla 4.3. Resultados de las pruebas de K-S, Berman (Z1 y Z2) y AUC para evaluar la influencia de variables específicas y de accesibilidad sobre los patrones de distribución de los antiguos asentamientos en Marmárica 304

Tabla 4.4. Se detallan los resultados de la fuerza del arco (*arc strenght test*) del modelo de red bayesiano que explora la relación entre la supervivencia y las características del paisaje 312

Tabla 4.5. Distribución relativa de tipología de sitios arqueológicos por zonas geográficas 315

CAPÍTULO V

Tabla 5.1. Resultados por periodo tras aplicar el modelo K-NN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad 413
Tabla 5.2. Resultados por periodo tras aplicar el modelo MDN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad 425
Tabla 5.3. Resultados por periodo tras aplicar el modelo RNN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad 433
Tabla 5.4. Resultados tras aplicar el modelo GG y *β-Skeletons,* indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad 445
Tabla 5.5. Resultados por periodo tras aplicar el modelo K-NN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad 487
Tabla 5.6. Resultados por periodo tras aplicar el modelo MDN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad 499
Tabla 5.7. Resultados por periodo tras aplicar el modelo RNN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad 507
Tabla 5.8. Resultados tras aplicar el modelo GG y *β-Skeletons*, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad 519
Tabla 5.9. Resultados tras aplicar el modelo GG y *β-Skeletons*, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad 531

CAPÍTULO VI

Tabla 6.1. Esquema de los 5 niveles (estrellas) de datos abiertos (*Open Data*) 558

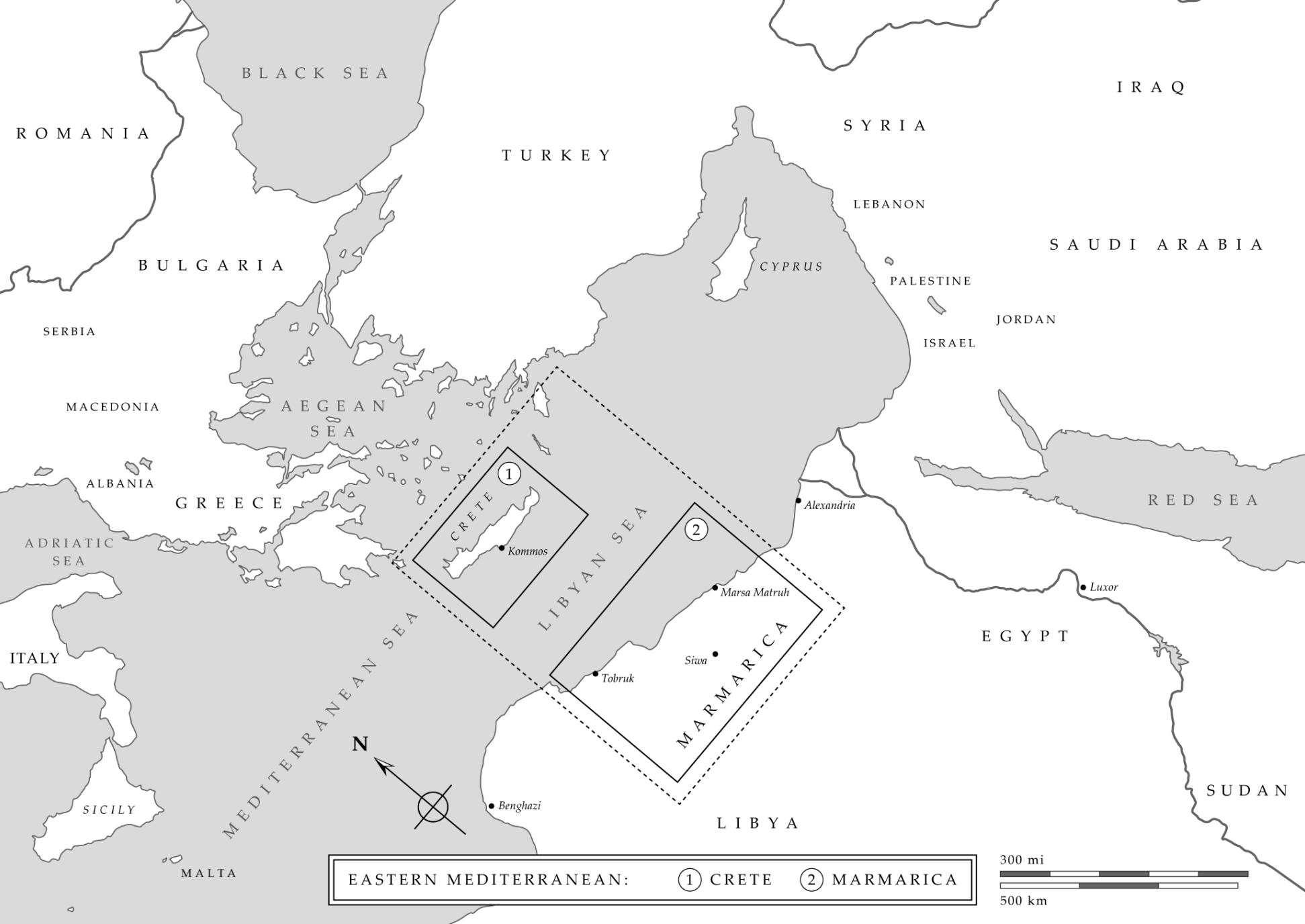
CAPÍTULO VII

Table 7.1. Travel costs, measured in days of sailing (based on a maximum speed of 6 knots), between Kommos and Marsa Matruh 654

Table 7.2. Travel costs, measured in days of sailing (based on a mean speed of 3 knots), between Kommos and Marsa Matruh 654

I

AN INTRODUCTORY JOURNEY


BLACK SEA
ROMANIA
TURKEY
SYRIA
IRAQ
LEBANON
SAUDI ARABIA
BULGARIA
CYPRUS
PALESTINE
JORDAN
ISRAEL
SERBIA
MACEDONIA
AEGEAN SEA
ALBANIA
GREECE
CRETE
Kommos
1
2
LIBYAN SEA
Alexandria
RED SEA
ADRIATIC SEA
Marsa Matruh
Luxor
EGYPT
ITALY
MEDITERRANEAN SEA
Siwa
Tobruk
MARMARICA
N
SICILY
Benghazi
LIBYA
SUDAN
MALTA
EASTERN MEDITERRANEAN: 1 CRETE 2 MARMARICA
300 mi
500 km

I

AN INTRODUCTORY JOURNEY

1.1 CONTRIBUTION & ORIGINALITY OF THE PROJECT

1.1.1 What is PERAIA?

The term *Peraia* (*περαια*) held significant meaning in ancient Greek thought, embodying a nuanced understanding of the spatial and social relationships between insular and mainland landscapes. Originally denoting "the land opposite" or "the land across [the water]," the term encompasses a geographic and conceptual duality: the interplay between land and sea (Lambrinoudakis, 1997; Knappett & Nikolakopoulou, 2015). In practice, when ancient Greek writers or inscriptions referred to *Peraia*, they generally meant a coastal region or territory politically controlled by, or maintaining influential relations with, the opposite shore (Constantakopoulou, 2007). Nonetheless, the concept was not a static descriptor but a dynamic construct that framed how coastal and island communities perceived, navigated, and interacted with their surroundings.

Crucially, *Peraia* conveys how ancient Aegean communities conceptualized their territories not as isolated units but as integral parts of a network of relationships. Far from being a rigid boundary, the sea served as a connective medium that fostered interaction, negotiation, and exchange. The term thus embodies a relational perspective, in which social relations and landscape dynamics were shaped through engagement with the "other," which was often situated just across the sea.

Recent scholarship underscores how connectivity shaped the Mediterranean, from ecological to social and economic dimensions (Horden & Purcell, 2000; Arnaud, 2005; Broodbank, 2013; Knapp & Van Dommelen, 2014; Leidwanger & Knappett, 2018; among others). Within this evolving landscape, *Peraia* can arguably be considered as a conceptual anchor for understanding how ancient coastal communities engaged with their immediate and extended landscapes as integral and reciprocal components of an interconnected system. These landscapes were continuously redefined through dynamic networks of interaction, challenging us to rethink how ancient societies understood and interacted with their environments. Consequently, the sea was not simply a barrier to be crossed; it was an active place imbued with meaning, facilitating relationships that extended beyond material goods to encompass ideas, practices, and identities. Such multifaceted interactions often resulted in "connected forms," that blended insular and mainland influences into distinctive social and cultural expressions.

The dissertation presented here arises from *The PERAIA Project: Landscapes, Networks, and Society along the Ancient Libyan Sea*, an inter- transdisciplinary initiative aimed at understanding, through a diachronic and multi-scalar comparative approach, the complex interplay between landscapes, networks, and societal structures in the Aegean (Crete) and northeastern Mediterranean Africa (Marmarica) regions. The project has been supported by the Spanish Ministry of Science, Innovation, and Universities (FPU17/06503) and the Vice-Rectorate for Research and Knowledge Transfer of the University of Granada (Ref: PPJIB2020.18). This financial backing enabled an exhaustive examination of archaeological evidence, historical networks, and environmental features, culminating in the results presented herein.

1.1.2 Why this Project?

The Mediterranean world experienced profound transformations in the constitution and characterization of societies inhabiting its shores from the Late Bronze Age to the Roman period (*ca.* 1400 BCE–300 CE). These communities were interconnected through complex networks operating across multiple scales, from local and regional to far-reaching Mediterranean dynamics (Knappett, 2011; Broodbank, 2013; Tartaron, 2013; Knapp, 2018; Knodell, 2021; among others). This research focuses specifically on these networks, examined through the case of the ancient Libyan Sea —a key maritime conduit connecting Crete (Greece) and Marmarica (NE-Libya/NW-Egypt). Yet, the theoretical and methodological approach employed could readily be applied to any of the regions surrounding the Mediterranean. As waterway, bounded by diverse and complementary landscapes, the Libyan Sea served as a vital nexus of human interactions, ranging from local practices and regional communities to long-distance voyages. Accordingly, this sea was more than a simple geographical feature; it was a dynamic place where materials, technologies, and ideas converged, impacting Mediterranean and North African-wide dynamics.

This timeframe —Late Bronze Age to the Roman period— witnessed profound transformations in social, economic, cultural, and political structures. The Mycenaean systems flourished and subsequently collapsed, leading to societal reorganizations at the end of the Prehistoric Bronze Age and Protohistoric Iron Age. These transitions were characterized by technological innovations, such as the progressive replacement of bronze with iron, and shifts in material culture, including evolving pottery styles. Concurrently, the emergence of city-states (*poleis*) redefined sociopolitical

structures, giving rise to dynamic urban centers that became hubs of trade, governance, and cultural innovation. These regions also experienced colonization phenomena, marked by the establishment of settlements across the Mediterranean, the Black Sea, and North Africa, which fostered extensive cultural and economic exchanges. These processes were accompanied by increasing urban nucleation, regional competition, and interregional connectivity, which played a crucial role in shaping sociocultural and sociopolitical dynamics (Dickinson, 2006; Broodbank, 2013; Tartaron, 2013; Knapp, 2021; among others). Later periods were defined by the integration of diverse regions into expansive cultural, political, and economic networks. These developments were reflected in the growth of urban centers, monumental architecture, and the spread of cultural and political influences. Such influences introduced new governance structures, infrastructure, and economic strategies, all of which solidified connectivity across the Mediterranean and beyond (Sanders, 1982; Raab, 2001; Chevrollier, 2016; Leidwanger & Knappett, 2018; among others).

The study of these societies, however, has long grappled —and continues to do so— with the fragmented and incomplete nature of the archaeological record. Traditional approaches often rely on inductive extrapolation to reconstruct complex pasts, a methodology constrained by the limitations of partial and altered evidence. In recent years, advanced technologies and analytical frameworks have emerged, offering transformative opportunities for archaeological research. Notably, those integrating digital and computational methods, including advanced mapping techniques, spatial analysis, machine learning, and network science, have proven effective in characterizing the spatial and temporal complexities inherent in

archaeological data. By leveraging these approaches, archaeologists can gain deeper insights into the dynamics of past societies and their interactions with the biophysical world. This study adopts this methodological paradigm shift, by emphasizing systematic experimentation and hypothesis testing as the cornerstones of exploratory research. Such a framework mitigates the challenges posed by the fragmented archaeological record, and enables reconstructing the complexity that characterized past societies.

This study also focuses on the long-term and multi-scalar implications of examining socioecological systems. Through a *longue durée* perspective on the interplay between human and non-human factors, it seeks to provide a valuable vision of how past communities responded to social, cultural, economic, and political changes, as well as environmental challenges, such as resource management and ecological resilience over time. These insights offer a historical lens through which contemporary issues, including climate change, environmental degradation, and resource overexploitation, can be addressed. Lessons drawn from past adaptive strategies underscore the potential for sustainable practices and informed policymaking, thereby encouraging a balance between local development, heritage preservation, and environmental stewardship.

Accordingly, the originality (and necessity) of this study lies in its diachronic scope, analytical methods, and multi-scalar approach to investigating historical interaction processes. Although this area is widely acknowledged as a significant geographical entity for the study of the (Pre)historic Mediterranean, no existing synthesis provides a comprehensive analysis of the expanding corpus of multi-period archaeological evidence to the extent

outlined herein. As a synthesis of the data pertaining to these regions, this study offers an integrated approach to understanding settlement and mobility patterns, socioeconomic structures, and ecological implications, which may prove valuable to other scholars. Beyond the specific analyses and interpretations that constitute the core of this work, its broader aim is to contribute to a comprehensive framework to understanding diachronic patterns within and between these regions, considering the coevolution of human and non-human agents in shaping these dynamics. Furthermore, it proposes novel perspectives to inform future research.

From a disciplinary standpoint, this study seeks to bridge long-standing disciplinary divides that persistently challenge contemporary archaeologists. Its diachronic scope is intended to overcome the traditional demarcation between prehistory and history —based on the presence or absence of written records— which often obscures the interconnectedness of prehistoric and historical periods. Yet, the value of transcending such divisions in the Mediterranean area has been acknowledged by some authors (e.g., Knodell, 2021), this study employs a framework that explicitly examines the relationships between coincident phenomena and their connections within diverse, multi-scalar networks of interaction. The central argument is based on the premise that fully understanding the historical processes and the evolution of long-term socioecological dynamics requires the consideration of multiple spatial and temporal scales. Each of them offers a distinct yet complementary perspective on how social, political, cultural, economic, and ecological structures evolution over time.

To accomplish this, the theoretical framework applied is based on landscape archaeology but also integrates principles from human ecodynamics, historical ecology (HE), and network thinking into archaeological research, which together form a novel approach. This holistic framework, while broadly applicable, is particularly well-suited for studying diachronic patterns in the context of the ancient Libyan Sea, where interactions across multiple scales —from local to global, micro to macro— fundamentally transformed the landscapes of the regions along its coasts. Therefore, this integrative framework provides a comprehensive approach to examine the processes occurring both within and across these interconnected regions, emphasizing the dynamic interplay among landscapes, networks, and complexity.

In a complementary and transversal way, this research incorporates data management models that address the full spectrum of actions required to identify, describe, evaluate, and share data effectively. A significant contribution in this regard lies in the inclusion of mechanisms designed to address data uncertainty and conduct risk assessments, thereby enhancing the reliability, robustness, and impact of the research. Furthermore, guided by the principles of Open Science, this study implements open research practices aimed at enhancing knowledge creation, fostering interdisciplinary networking, and enhancing transparency and communication. These practices advance the field of archaeological research by ensuring that the data and results remain accessible and reusable, which at the same time contributes to a more inclusive and sustainable approach to research processes in archaeology.

1.1.3 Aims, Research Questions and Hypothesis

Drawing on the theoretical and methodological foundations outlined previously, the **main objective** of this study is to investigate the long-term socioecological dynamics along the ancient Libyan Sea, encompassing both the Aegean (represented by Crete) and northeastern Mediterranean Africa (represented by Marmarica). Through the creation and analysis of diverse datasets, this research aims to elucidate patterns and trends that reveal key aspects of human-environment interactions over the *longue durée*, spanning from the Late Bronze Age to the Roman period (*ca*. 1400 BCE – 300 CE). Thus, this study is specifically focused on three critical dimensions of interaction:

1. The dynamics of coupling between social units and their environment.
2. The evolution of sociospatial networks.
3. The interplay between scale and complexity in shaping past societies.

Grounded in a diachronic and multi-scalar approach, the research explores how networks centered on these regions exhibit localized and broader-scale connections, facilitating the rapid dissemination of innovations, influencing periods of centralization, decentralization, and fostering adaptive responses to environmental and human challenges. These fluctuating patterns underscore the interconnected and dynamic nature of landscapes, networks, and social structures. Ultimately, they highlight the critical role of the ancient Libyan Sea as a mediating entity in the broader interaction processes across the Mediterranean and North Africa.

To achieve this, the study defined four **specific objectives (SO)**:

SO.1 To assess diachronic settlement patterns and phases of human occupation, tracing their evolution from the Late Bronze Age to the Roman period in Crete and Marmarica.

SO.2 To (re)construct and analyze past human mobility and interaction patterns within and between these communities, revealing how networks served as critical channels for social, cultural, economic, and political exchanges over the *longue durée*.

SO.3 To examine these interaction processes from a complex systems perspective, emphasizing the interplay between environmental (non-human) and societal (human) factors, creating a research framework capable of addressing both temporal and multi-scalar dimensions of socioecological dynamics in mainland and island communities.

SO.4 To adhere to ethical research practices inspired by the principles of Open Science, focusing on responsible management, storage, and dissemination of data, methods, and results, with an emphasis on promoting open data for research accessibility and transparency.

This approach involved developing diverse interpretative models through the integration of evidence from various sources and different natures. Importantly, the research aimed to elucidate how interrelationships between human and non-human factors shaped human occupation, interaction patterns, and landscape dynamics across these regions. Based on these considerations, a series of foundational **research questions (RQ)** was established to guide the analysis and ensure that the models effectively addressed the issues detailed below:

SO.1 Site distribution patterns

RQ1.1 How did site distributions and the density of human occupation in Crete and Marmarica evolve over time —from the Late Bronze Age through the Roman period—, and which environmental (non-human) or social (human) factors most significantly influenced these patterns?

RQ1.2 What regional and chronological variations can be observed in these regions, and how do these differences reflect processes such as urban expansion, resource exploitation, trade, or political and environmental upheavals?

RQ1.3 How did settlement structure and organization evolve in Crete and Marmarica, and what do these changes reveal about shifting environmental and human conditions over time?

SO.2 Human mobility and interaction networks

RQ2.1 What were the primary mechanisms and pathways that influenced human mobility and interaction networks across the Libyan Sea, and how did these networks facilitate or constrain social, cultural, economic, and political exchanges within and between Crete and Marmarica?

RQ2.2 How did interaction patterns adapt or transform in response to changing environmental conditions and historical events, and what factors most strongly drove these shifts?

RQ2.3 What roles did pivotal nodal points and links play in shaping multi-scalar connectivity, and what impact did these nodes and links have on the social, economic, and political dynamics of these regions?

SO.3 Socioecological dynamics

RQ3.1 What co-evolutionary dynamics existed between human communities and their environments, and how do these shaped the structuring of historical landscapes?

RQ3.2 How can multi-scalar data—from local to regional and interregional records —be integrated into models that capture patterns of order, structure, and change?

RQ3.3 Which core principles —such as emergence, feedback loops, and resilience—are most applicable to understanding long-term socioecological interactions between mainland and island communities?

SO.4 Ethical research practices

RQ4.1 Which guidelines or frameworks are most effective for ensuring transparent research methodologies, and how can these be implemented to facilitate accessible and reproducible research?

RQ4.2 How can data-sharing protocols and open-access repositories be designed to ensure long-term preservation of research data while promoting broad scholarly and community engagement?

RQ4.3 Which ethical considerations arise when managing archaeological and environmental data from sensitive heritage sites, and how can they be reconciled with Open Science principles?

Overall, given the exploratory nature of this research, it started from broader research questions that collectively support the research aims by emphasizing diachronic and multi-scalar dimensions of human-environment interactions, the structure of sociospatial networks, and the imperative of ethical accessibility, transparency, and openness in archaeological research.

Following the three critical dimensions of this study, settlement distribution, density, and organization in Crete and Marmarica can reveal how environmental variables —such as orography, climate fluctuations, water availability, and broader ecological conditions— both enabled and constrained influences on social units in these regions. At the same time, human agency potentially mediated these environmental affordances, leading to adaptive strategies such as changes in land use, shifts in settlement locations, and resource management. The underlying assumption here is that societies respond to ecological challenges and socioeconomic opportunities. Consequently, iterative feedback loops likely emerged, in which successful adaptive responses in one period potentially influenced subsequent approaches, fostering either resilience or vulnerability. To test this hypothesis, the analysis initially considered archaeological and environmental indicators and subsequently assessed diachronic archaeological site distribution patterns and spatial correlations between human and non-human factors.

The second dimension posits that local, regional, and interregional exchanges were central in shaping complex social landscapes. Here, we hypothesize that the Libyan Sea functioned as a critical conduit, with key connections through strategic harbors such as Kommos (Crete) and Marsa Matruh (Egypt) (Wachsmann *et al.*, 2009), facilitating connectivity between the Aegean and northeastern Africa. This connectivity likely enabled the dissemination of goods, technologies, and sociocultural practices. Over time, these networks may have fluctuated in prominence, reflecting periods of centralization or fragmentation. Methodologically, this hypothesis can be tested by focusing on key nodal points (e.g., harbors, urban centers, etc.) and connections (e.g., routes, strategic corridors, etc.). This approach stems from network thinking,

which posits that the topological structure of networks (nodes and edges), exerts significant influence on the flow of communication and exchanges. By analyzing these patterns through spatial and network models, we can determine how interaction networks reinforced social, cultural, and economic cohesion or, conversely, contributed to sociopolitical fragmentation.

Third, from a theoretical standpoint, the study hypothesizes that as these societies navigated their landscapes, their actions, influenced by continuous human interrelationships, led to increased social complexity. However, this complexity did not follow a linear progression; instead, the hypothesis reflects the idea that ancient societies are best understood as complex adaptive systems, exhibiting non-linear responses to feedback loops, threshold events, and emergent organizational forms. These systems featured phases of heightened centralization and integration, punctuated by fragmentation and reorganization when overarching systems became unsustainable due to the intensification of internal or external pressures. Adopting a complex system perspective allows for the integration of multi-scalar analysis, providing a framework to model how micro-scale shifts can precipitate macro-scale events. This approach challenges the limitations of linear or single-factor causal explanations, emphasizing that resilience and collapse are often co-emergent properties within interconnected systems.

In sum, the hypothesis of this study derives from the overarching premise that the Libyan Sea —bridging the Aegean (Crete) and the northeastern African mainland (Marmarica)— functioned as a dynamic corridor of interaction rather than a mere barrier, shaping long-term socioecological interactions. By situating these processes within a diachronic and multi-scalar framework, the

research examines how environmental and societal factors operated in causally entangled chains over time, which collectively shaped how communities settled, moved, and interacted.

Finally, it is essential to recognize that conventional assumptions on the development of scientific research, often portrayed as a linear sequence of "aims, research questions, and hypothesis", may be misleading. This model implicitly assumes that researchers first set their overarching aims or broad questions, then refine them into specific research questions, and finally articulate hypotheses to be tested. In practice, however, scientific inquiry is far more dynamic and non-linear process. For instance, researchers may begin with a broad aim and formulate research questions. In attempting to answer these questions —or while reviewing preliminary results— new insights may emerge, prompting the refinement of the original aims, questions, and the reframing or refinement of hypotheses. Alternatively, a hypothesis inspired by existing theories or evidence may lead to rethinking the aims or reframing research questions to address gaps or explore new directions.

This interplay reflects the exploratory nature of this research, wherein each step informs and reshapes the others. Consequently, the model of "aims, research questions, and hypothesis" model should be understood as an interconnected process rather than a fixed linear progression. Such flexibility not only accommodates the realities of empirical research, where unexpected results often compel the reexamination of initial assumptions, but also embraces the creative aspect of scientific inquiry, thriving on the continual refinement and reinterpretation of our understanding of the historical phenomena under study.

1.2 GEOGRAPHICAL FRAMEWORK: BETWEEN MESOGEAN & SAHARA INFLUENCE

1.2.1 Defining the Study Area: Boundaries and Landscapes

The study area encompasses mainland coastal and island regions bordering the ancient Libyan Sea, with particular emphasis on Crete (Greece) and Marmarica (northeastern Libya and northwestern Egypt). Geographically, these areas sit at a crossroads between the Mesogean influence of the Mediterranean basin and the arid, desert-like conditions of the Sahara facing North Africa. These dual dynamics have historically shaped —and still do— the ecological conditions, resource distributions, and patterns of human occupation across these Mediterranean and desert-edge landscapes (Figure 1.1).

First, Crete, the largest and southernmost Greek island —excluding the islets of Gavdos, Khrisi, and Koufonisi— spans approximately 245 km in length and up to 50 km in width (Pendlebury, 1939). Its diverse landscapes, shaped by both natural and human-induced changes, have undergone significant transformations over millennia. Located at the southern edge of the Aegean Sea, Crete holds a strategic position at the crossroads of major maritime routes, connecting the Greek mainland with the broader Eastern Mediterranean, historically linking regions such as Anatolia, the Cyclades, and North Africa —including Cyrenaica, Marmarica, and the Nile Valley— via the Libyan Sea. These natural waypoints, combined with the island's ecological diversity, have established Crete as a crucial hub for trade and cultural exchanges within broader interconnected Mediterranean networks.



Figure 1.1. Satellite imagery illustrating the sociospatial area of interactions between Crete (Aegean) and Marmarica (North Africa) along the Libyan Sea. Basemap: : © *ESRI.*

The second area covered by this study includes territories of present-day northeastern Libya, northwestern Egypt, and northern sections of the Libyan Desert —i.e., the Sahara Desert within its northeastern boundaries. Nevertheless, we propose defining this area as "Marmarica," —a term based on biogeographical units and written sources. Therefore, Marmarica is a region situated in northeastern Mediterranean Africa, spanning approximately 400-500 km east-west and 200–300 km north-south, occupying the transitional zone between the Mediterranean coast and the arid expanses of the Libyan Desert. Although its geographical boundaries are not precisely defined, they can generally be delineated as follows: to the north by the Mediterranean Sea (Libyan Sea), to the south by the Great Sand Sea (Libyan Desert), to the west by Cyrenaica (Libya), and to the east by the Qattara Depression (Egypt) (Hulin, Timby *&* Mutri, 2009; Vetter, Rieger *&* Möller, 2013). These boundaries encompass diverse semi-arid and arid landscapes characterized by the dynamic interplay between coastal and desert environments. This duality defines Marmarica's unique ecological and geographical features, offering a broad framework for understanding its spatial extent and its role within the Mediterranean and North Africa.

A particularly notable aspect of this historical region is its unique geographical position, which underscores its significance as a nexus of trade routes and cultural exchanges. Marmarica stands out as a crucial bridge connecting the fertile Nile Valley, the rich Cyrenaica, the bustling Mediterranean harbors, and the hinterland oases. This strategic location fostered dynamic interactions between varied societies and landscapes, leaving a legacy of scattered archaeological and cultural heritage across its lands.

1.2.2 Physical Geography and Ecological Context

Both Crete and Marmarica exhibit diverse landscapes shaped by a complex interplay of geological processes, climatic regimes, and human-induced actions. Although connected by their proximity through the Libyan Sea, these regions differ significantly in topographical formations, hydrological patterns, and land cover. Such variations are crucial for understanding how these societies, negotiated resource availability, managed settlement locations, and responded to environmental conditions across various historical periods. These differences not only influenced their immediate subsistence strategies but also had lasting impacts on their social, cultural, economic and political developments.

In the case of Crete, the island's varied topography is defined by prominent mountain ranges —the White Mountains (Lefka Ori), Mount Ida (Psiloritis), and the Dikti Mountains— which serve as both natural barriers and landmarks. These ranges, interspersed with deep prominent valleys and narrow coastal plains, significantly shape settlement patterns and resource distribution (Cunningham & Driessen, 2004). The geological cores of the island's mountain massifs are composed of stacked limestone and dolomite tectonic nappes —i.e., large-scale sheets of rock squashed together by tectonic forces. These nappes, exposed through uplift and erosion, reflect Crete's dynamic geomorphological history at the southern edge of the Aegean Plate, near the Hellenic Arc, a prominent tectonic feature resulting from the subduction of the African beneath the Eurasian Plate. In contrast, the lowlands and plains, formed by younger sediments deposited during the Neogene and Quaternary periods, have long served as focal points for human habitation and agricultural activity (Grove, Moody & Rackham, 1991;

Rackham & Moody, 1996; Rackham *et al.*, 2010; Moody, 2000; Kirsten & Heinrich, 2022; Pollard, 2022).

These geological and topographical features of Crete significantly influence land-use patterns, shaping diverse agricultural practices such as terrace farming in the uplands and the extensive cultivation of olives and cereals in the plains. Consequently, settlements often cluster near alluvial plains or natural harbors, where fertile soils and accessible trade routes support dense populations (Pendlebury, 1939). Archaeological sites like Phaistos exemplify such assumptions, being located on fertile alluvial plains with access to land and maritime routes. These patterns underscore the centrality of fertile lands for agriculture as well as for trade and sociocultural exchanges.

This interplay between upland and lowland, mountain and plain, reflects Crete's inherent duality —a landscape of contrasts shaped by both human (e.g., agriculture and urban development), and non-human factors (e.g., tectonic movements and climatic variations) over time. Consequently, settlement strategies on Crete adapted to not only shifts in resource availability and ecological conditions but also to human capabilities, illustrating the resilience of its societies. Its enduring role as a socioecological "historical palimpsest" —i.e., a layered record of coevolutionary interactions between human and non-human forces, with each period leaving its imprint on the landscape— highlights the intricate interplay shaping Crete's natural and cultural trajectories. Understanding these landscapes as both physical and dynamic social record of human-environment interactions provides a robust foundation for interpreting Crete's historical and ecological narratives.

On the other hand, Crete's Mediterranean climate is characterized by hot, arid summers and mild, wet winters, influenced by seasonal patterns that impact on both ecosystems and human activities. Annual precipitation ranges from approximately 450-600 mm but varies significantly between the west and east, as well as between upland and lowland regions, with mountainous areas receiving substantially more moisture than the plains (Moody, 2000; Chartzoulakis, Paranychianakis *&* Angelakis, 2001; Markonis *et al.*, 2016). Similarly, temperature variations are more closely linked to altitude than longitude, further affecting the distribution of flora and populations across the island. This climatic heterogeneity, combined with Crete's diverse topography, shaped distinct subregional biogeographical units or ecological zones —i.e., zones characterized by unique combinations of flora, fauna, and ecological processes. Such ecological zones present notable distinctions among western (Khania), central (Rethymno and Heraklion), and eastern Crete (Lasithi), and thus, they historically influenced settlement patterns and socioeconomic practices.

Rivers and seasonal streams, such as the Geropotamos, create pockets of fertile alluvial plains suitable for agriculture, although most of the terrain requires terracing to support extensive cultivation. The vegetation includes typical Mediterranean shrub (maquis), *sclerophyllous* woodlands, and cypress and pine forests in upland zones (Rackham *&* Moody, 1996). Fertile plains like Messara and Amari, separated by imposing ridges, supported ancient agricultural communities. In contrast, isolated upland plains such as Lasithi and Omalos served as seasonal grazing grounds for shepherds. These upland areas, often enclosed by karst formations, provided self-contained ecosystems vital to sustaining life in antiquity (Pendlebury, 1939: 6-7). This differentiation

in land-use patterns illustrates the adaptive strategies of ancient inhabitants, who maximized the utility of Crete's diverse environments. These strategies not only shaped the island's natural ecosystems but also profoundly influenced settlement patterns, agricultural practices, and cultural developments. Hence, the dynamic interplay among climate, topography, and human activity has crafted diverse landscapes that are both resilient and sensitive to environmental shifts over millennia.

This understanding of Crete's paleoclimate primarily derives from numerous studies that have employed different *proxies* —such as pollen cores, isotopic analyses, fossil records, and others— to reconstruct ancient ecological conditions (Bottema, 1980; Bottema *&* Woldring, 1990; Moody, 2000, 2016; Bottema *&* Sarpaki, 2003; Angelakis *&* Vavoula, 2012; Amato *et al.,* 2014; Ghilardi *et al.,* 2019; Christopoulou *et al.,* 2024; among others). Another significant indicator is the evidence of alterations in the coastline, which underscores the island's dynamic geomorphological history (Mourtzas, Kolaiti *&* Anzidei, 2016; Mourtzas *&* Kolaiti, 2017a, 2017b, 2020; Kolaiti *&* Mourtzas, 2021). Ancient harbors, such as Phalasarna, were left stranded inland, while others, once thriving hubs, were rendered obsolete (Pendlebury, 1939: 3; Dominey-Howes, Dawson *&* Smith, 1998). Despite these changes, ancient settlements adapted to these transformations by relocating to areas with natural protections that ensured the continued prosperity and security of their communities despite the evolving landscape. Thus, these techniques allow for an accurate and nuanced reconstruction of the island's environmental history, facilitating a deeper understanding of the interactions between climate, geography, and human agency from a long-term perspective.

In the case of Marmarica, the topography of the region varies from stepped to flat, with geology predominantly characterized by Eocene limestone formations, interspersed with Quaternary sand deposits closer to the desert fringes (Embabi, 2018). The climate ranges from semi-arid to arid conditions, with poor annual rainfall, which tends to occur in brief but occasionally intense storms, replenishing ephemeral watercourses (*wadis*) —i.e., dry riverbeds with potential for flooding, typically in arid environments— and desert aquifers. Additionally, this region includes alluvial fans formed by sediment deposition and cultivated terrace systems on lower lateral valley slopes and tableland plains (Vetter, Rieger & Möller, 2013). The northern areas, influenced by the Mesogean climate associated with the Mediterranean basin, benefit from relatively higher precipitation (up to 160 mm annually). In contrast, the southern regions, ecologically dominated by the Sahara element, experience increasingly arid conditions where precipitation declines sharply to below 35 mm annually, resulting in steppe environments characteristic of desert landscapes (Quézel, 1978; Vetter, Rieger & Möller, 2013; Vetter & Rieger, 2019; Rieger, 2019, 2023).

Regarding the paleoclimate of Marmarica, environmental studies have shown that at least since the 1st millennium BCE, the northeastern part of the Sahara Desert (Libyan Desert) has not experienced significant changes in climate or water availability (Bruins, 2006; Kuper & Kröpelin, 2006; Vetter, Rieger & Nicolay, 2009). Nevertheless, since ancient times, the landscape across the entire region is not uniform and responds to a series of environmental conditions that allow for the identification of different biogeographical units shaped by notable climatic variations from north to south (Vetter, Rieger & Möller, 2013; Vetter & Rieger, 2019). This gradient not only dictates the

distribution and types of natural vegetation—ranging from drought-resistant shrubs in semi-arid areas to sparse *xerophytic* plants —i.e., plants adapted to survive in environments with little water in hyper-arid zones— (Quézel, 1978) but also influences the potential suitability of various areas for agriculture, grazing, and habitation. For instance, agricultural practices are more viable in northern regions due to adequate rainfall, whereas arid areas may be limited to nomadic herding or necessitate advanced irrigation techniques to sustain crop production. Understanding these ecological variations is crucial for sustainable regional planning and resource management, particularly in the face of climate variability and increasing human pressures.

Within this context, the region can be delineated in diverse ecological zones, including: (i) Coastal Zone and Northern Tableland, a semi-arid area approximately 15 km wide, with the highest annual rainfall (150–120 mm). This relatively favorable precipitation, combined with runoff concentration facilitated by *wadi* incisions, supports small-scale agricultural and pastoral activities. (ii) Pre-Marmarican Plain, extending 15–35 km inland, transitions to semi-arid and arid conditions with annual rainfall declining to 115–80 mm. This flat zone lacks linear drainage systems, and runoff is primarily collected in shallow depressions. The absence of evidence for ancient cultivation emphasizes the agricultural viability of this area. Nonetheless, the scattered vegetation still supports grazing, underscoring its potential as a rangeland. The presence of the Marmarican cliff as a distinct southern boundary provides a geomorphological marker of ecological transition, further reinforcing the role of topography in shaping land-use suitability. (iii) Northern Marmarica Plateau, with annual rainfall dropping from 80 mm to 45 mm, marks a critical ecological threshold between semi-arid and arid conditions. The contraction

of vegetation patterns and the infeasibility of cultivation highlight the growing agricultural limitations of this area. The occasional suitability for grazing in wetter years underscores the region's susceptibility to climatic fluctuations. (iv) Marmarica Plateau situated 70–90 km from the coast, represents the transition from semi-arid to full desert conditions, with annual rainfall around 40 mm. Vegetation thinning intensifies, and the zone's agricultural potential becomes negligible. This reinforces the region's dependence on drought-tolerant species and extensive land-use systems, albeit under significant ecological stress. (v) Central Marmarica Plateau, beyond 90 km from the coast, transitions into fully arid desert conditions, characterized by annual rainfall below 35 mm and a near absence of permanent vegetation. The scarcity of water and forage severely limits land-use options (Vetter, Rieger & Möller, 2013: 457-458).

In addition to its varied ecological zones, Marmarica holds significant oases that punctuate the arid southern areas and serve as vital centers of human habitation and socioeconomic activity. These oases include Al-Jaghbub in Libya, and Siwa and Qara in Egypt, which exhibit an advanced understanding of water management and soil cultivation techniques tailored to arid conditions —often featuring date palms (*Phoenix dactylifera*), cereals, and legumes. Small-scale irrigation systems have historically bolstered these cultivations, while pastoralism remains essential for communities living on the desert edges. Such ecological adaptations underscore the importance of water management and strategic mobility for maintaining human occupation in Marmarica's arid landscapes (Snape, 2003, 2013). These oases also serve as hubs for socioeconomic transactions, where goods such as spices, textiles, and livestock were traded, fostering cultural interactions and the dissemination of

technological innovations. Furthermore, oases acted as sociocultural melting pots, where diverse traditions converged, integrating to enrich the cultural identity of these communities. Understanding the role of these oases is crucial for understanding the dynamics of human habitation and resource management in Marmarica, particularly in the face of climate variability and increasing anthropogenic pressures.

When viewed collectively, Crete and Marmarica illustrate how the Mesogean and Saharan realms converge, producing a mosaic of ecological niches and sociocultural trajectories. In Crete, rugged mountainous belts and accessible coasts defined the island's settlement locations and seafaring traditions. In Marmarica, desert fringes and resource-scarce interiors fostered mobile lifeways, alongside maritime activities and small-scale agricultural practices in the littoral zones and hinterland oases. By focusing on these two geographically and ecologically distinct yet interconnected regions, the study foregrounds the diversity of landscape settings along the ancient Libyan Sea. This emphasis enables an analysis of how societies adapted to and capitalized on the interplay between coastal and desert conditions, bridging zones of Mediterranean temperate climates and Saharan aridity. The result is a nuanced portrait of human-environment interactions in an area uniquely poised at the threshold of land and sea, temperate and arid, insular and continental worlds.

1.2.3 Human and Environment Impacts

Beyond the specific biophysical characteristics of these regions, their landscapes are intrinsically intertwined with pronounced vulnerabilities stemming from coupled anthropogenic and environmental processes. Since the latter half of the 20th century, both regions have undergone rapid transformations driven by increasing regional development, including urban expansion, road construction, agricultural practices, and sociopolitical conflicts (Sheldrick & Zerbini, 2017; Westley *et al.,* 2021, 2023; Breen *et al.,* 2022; among others). Additionally, environmental processes accelerated by climate change further intensify these vulnerabilities (Vousdoukas *et al.,* 2022). These landscape modifications, fueled by human-induced actions and environmental stressors, have placed considerable pressure on the archaeological heritage. Consequently, these changes result in the physical degradation of site structures, the loss of cultural context, and reduced opportunities for archaeological research.

On Crete, anthropogenic activities have significantly altered its environments through agricultural practices, urban expansion, and resource management. Notably, evidence of terracing and irrigation systems highlights the role of agricultural practices in transforming the landscape (Jouffroy-Bapicot *et al.,* 2016). Moreover, the intensification of cultivation, coupled with timber harvesting and other resource overexploitation, has led to progressive yet profound changes, including soil degradation and habitat alteration. In fact, deforestation has profoundly reshaped the island's environment since ancient times (Pendlebury, 1939; Moody, 2000). Once covered in dense forests, large parts of Crete are now predominantly barren, and much of its bare soil has eroded. This degradation, further accelerated by environmental challenges,

has also restricted water availability and contributed to the degradation of previously fertile areas (Atherden & Hall, 1999; Bottema & Sarpaki, 2003). Rivers that once flowed robustly now often run dry in summer, and springs that supported ancient populations have largely vanished. Such historical patterns underscore the long-term impacts of human and environmental forces —further accelerated by climate change—, illustrating the critical need for maintaining a balance between human development and environmental sustainability to preserve the Cretan archaeological landscape.

Similarly, in Marmarica, immediate threats primarily stem from urban expansion, intensified agricultural practices, transportation infrastructure, and sociopolitical conflicts (Chirikure, 2013; Di Lermia & Gallinaro, 2014; Nikolaus, Abdrbba & Emrage, 2022; among others). These pressures are particularly pronounced in areas experiencing significant regional development. Additionally, environmental threats, largely driven by widespread aridity, accelerate natural erosion, exposing many of these sites to substantial degradation. Other risks involve shifting temperature and precipitation patterns, as well as altered coastlines, all of which reflect the growing impacts of climate change (Vousdoukas *et al.*, 2022). Such factors collectively underscore the vulnerability of Marmarica's archaeological heritage in the face of both human-driven and environmental stressors.

Consequently, the continuous interaction between humans and their environment in both Crete and Marmarica cannot be understood solely through the lens of human agency or environmental determinism. Instead, it reflects a reciprocal relationship wherein environmental pressures drive adaptive strategies, while human actions reshape the environment. Therefore,

processes related to settlement patterns or population mobility responded not only to environmental challenges but also to socioeconomic opportunities. Recognizing these coevolutionary interrelationships between human and non-human agents is crucial for developing preservation strategies that balance human needs with environmental sustainability.

In sum, over millennia, the cumulative effects of human and non-human agents have left lasting imprints on the landscapes of Crete and Marmarica. In Crete, primarily agricultural practices and urban expansion, in conjunction with environmental processes accelerated by climate change, have degraded archaeological sites, with landscape transformations attesting to the island's long-standing human-environment interactions. In Marmarica, natural erosion —also accelerated by human-induced actions— and regional development have degraded or potentially destroyed sites, similarly reflecting a history of adaptation and transformation. Together, these regions provide a valuable record of landscapes shaped by significant changes over time, highlighting both resilience and vulnerability. By examining the interplay between human and non-human factors, we gain deeper insights into the drivers of landscape evolution and uncover lessons for sustainable management. Therefore, these enduring features not only enable us to understand the past but also pose critical challenges for present-day heritage preservation. Moreover, they contribute to the broader historical narrative of the ancient Libyan Sea, offering valuable perspectives on resource management and human resilience in the face of socio-environmental changes. This reciprocal relationship underscores the complexity of historical human-environment interactions and emphasizes the need for integrated approaches in archaeological and environmental research.

1.3 HISTORICAL SETTING: INTEGRATING PREHISTORY & HISTORY IN A LONG-TERM PERSPECTIVE

1.3.1 Contextual Approach

The historical setting presented here underscores the complexity and dynamism of the late 2nd millennium BCE to early 1st millennium CE in the Eastern Mediterranean. Over these centuries, communities witnessed significant fluctuations in cultural and political forms —from the emergence of sociopolitical systems to their eventual demise— alongside major transformations in socioeconomic practices, material culture, trade, and exchange networks. As this study shows, these developments did not unfold uniformly; instead, they were influenced by local-regional trajectories, trans-Mediterranean contacts, and shifting centers of power that, at various junctures, pivoted among different regions (Table 1.1).

A central theme that emerges from this overview is the disciplinary breadth required to investigate these transitional centuries. In this regard, this study addresses an intricate challenge: reconciling diverse regions, chronologies, and historiographical traditions, aligning with the established research framework and goals. Such diversity amplifies the complexity of harmonizing data and interpretations, and underscores the need for holistic research. Together, this integrative strategy addresses the importance of examining both large-scale trends and local-regional developments, which is crucial for understanding the long-term socioecological dynamics that shaped landscape transformations across these pivotal regions and historical periods.

Table 1.1. Chronological scheme of historical periods covered by this study.

<table>
<tr><th colspan="4">Chronological scheme</th><th rowspan="2">Date
(ca.)</th></tr>
<tr><th colspan="2">Greece
(Crete)</th><th>Northeastern Mediterranean Africa
(except Egypt)</th><th colspan="2">Egypt
(Nile Valley)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Final Palatial</td><td>Late Minoan IIIA</td><td rowspan="3">?
(Bates' island)</td><td rowspan="3">New Kingdom</td><td>Mid-18th dynasty (Thutmose III Menkheperre)</td><td rowspan="3">1479 – 1069 BCE</td></tr>
<tr><td>Late Minoan IIIB</td><td rowspan="2">19th-20th dynasty (Ramesside dynasties)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Post-Palatial</td><td>Late Minoan IIIC</td></tr>
<tr><td>(Subminoan)</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="3">Early Iron Age / "Dark Age"</td><td>Protogeometric</td><td rowspan="4">Greek colonization
(Kyrene, Barca, Euesperides, Taucheira, Apollonia)</td><td colspan="2" rowspan="3">Third Intermediate Period
21st-25th dynasties (Libyan dynasties)
(Naukratis *Greek colony)</td><td rowspan="3">1069 – 656 BCE</td></tr>
<tr><td>Geometric</td></tr>
<tr><td>Orientalizing</td></tr>
<tr><td>Iron Age</td><td>Archaic</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Classical</td><td rowspan="3">Graeco-Roman period</td><td rowspan="2">Late Period (26th dynasty)</td><td>First Persian period (27th dynasty)</td><td rowspan="2">656 - 332 BCE</td></tr>
<tr><td>Late dynastic period (28th-30th dynasties)
Second Persian period (31st dynasty)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Hellenistic</td><td>Early Hellenistic</td><td rowspan="2">Ptolemaic Period</td><td>Macedonian period (Alexander the Great)</td><td rowspan="2">332 – 30 BCE</td></tr>
<tr><td>Late Hellenistic</td><td>Ptolemaic / Lagid dynasty</td></tr>
<tr><td colspan="3">Roman period
(Crete & Cyrenaica roman province)
(67 BCE-297 CE)</td><td colspan="2"></td><td>30 BCE – 300 CE</td></tr>
</table>

One consequence of this approach is a reevaluation of periodization schemes. To address this challenge, the study integrates a comparative chronological sequence by drawing on diverse, well-established sources —an approach that is examined in the subsequent chapters (see Cap. III, Escalas espacio-temporales). These resources have provided a robust comparative chronological framework facilitated a more effective assessment of varying historical realities and enhanced our comprehension of the historical context of regions corresponding to present-day Greece, Libya, and Egypt.

Through this approach, we examined distinct "temporalities" within the established timeframe, guided by the premise that historical processes unfold across multiple temporal scales (Braudel, 1949/2019). These scales include: (i) Long-term processes, which establish the overarching framework of cultural history in these regions. They are often segmented by specific events serving as rupture points, each marking the end of one period and the onset of another. Such transitions typically align with crises that destabilize existing systems and necessitate wide-scale reorganization. (ii) Intermediate periods, reflecting cycles of stability and equilibrium. Rather than marked progress, these phases exhibit a balance of forces that may eventually be disrupted, leading to transformations in the continuity of long-term processes. (iii) Short-term events or crises, which introduce immediate changes with the potential to reverberate systemically. These sudden disruptions offer critical insights into the interplay between stability and transformation in historical systems.

The central argument emphasizes the importance of examining historical processes and the evolution of socioecological dynamics across multiple spatial and temporal scales. Each of them offers a distinct yet complementary

lens on how social, economic, political, and cultural structures develop and change over time. Specifically, while long-term processes provide a macro-historical context, intermediate cycles reveal patterns of stability and equilibrium, and short-term events highlight moments of critical systemic change. This perspective provides a more comprehensive understanding of how these systems adapt and transform over time.

By integrating these temporal perspectives, we enhance our ability to interpret the complexities of historical evolution across regions such as Cretan Greece and the Libyan-Egyptian Marmarica. This diachronic and multi-scalar approach not only fosters a nuanced understanding of sociohistorical phenomena but also highlights the interconnectedness of processes that transcend regional boundaries and temporal historiographical subdivisions, further emphasizing both shared and distinctive features of these societies. Through this, the study seeks to contribute to the broader historiographical and archaeological discourse, offering a research framework for comparative analysis in complex, multi-regional, and multi-temporal contexts.

In so doing, this research brings a renewed focus on phenomena of continuity and change, including regional divergences in settlement patterns, the absorption or transformation of sociospatial interactions processes, and the gradual establishment of practices —economic, cultural, and political— that define social complexity. Ultimately, such a diachronic perspective clarifies how multi-scalar socioecological dynamics navigated through periods of dramatic upheaval, at the same time that showcases communities' resilience to maintain, innovate, and consolidate their foundations over centuries in the Aegean and North African worlds.

1.3.2 Historical and Archaeological Significance

The "what", "where", "how", "when", and even the "why", aspects of the research have been introduced, but the real question has not yet formulated: What lies beneath the selection of these regions? At its core, this study examines how specific regional ecologies, topographies, and strategic positions shape —and are shaped by— both human and non-human trajectories over the *long durée*. To illustrate these dynamics, we posit that the case studies of Crete and Marmarica are essential not only for their historical and archaeological significance but also because they exemplify that the physical environment is not merely a passive backdrop for human development. It rather functions as a dynamic canvas upon which communities continuously negotiated and interacted. By emphasizing the interplay between the environment and human factors in these dynamics, the study of these regions has the potential to elucidate broader processes that connect the Aegean and North Africa.

However, the historiographical narrative of contacts between Crete and Marmarica has traditionally depicted these interactions as "marginal" —particularly in comparison to regions like the Nile Valley or Cyrenaica— (e.g., Cooper, 2022), which may be considered misleading, given the strategic position of both regions. Far from being marginal, these regions served as crucial facilitators of trade and exchange, connecting urban centers and sociocultural hubs, including Aegean and Libyan-Egyptian harbors, with significant oases like Siwa and other trans-regional nodes (White *&* White, 1996; Wachsmann *et al.*, 2009; Rieger, Möller *&* Vetter, 2013; Snape, 2013; Hulin, 2015; Nielsen, 2017; Knapp *&* Demesticha, 2017; among others). Goods such as metals, food, raw materials, and textiles were commonly traded

through Crete, utilizing established land and maritime routes that traversed diverse landscapes (Watrous, 1985, 1992; Knapp, 1991, 2018; Chaniotis, 1999; Tartaron, 2013; Broodbank, 2013). The presence of trade hubs and exchange networks through Crete was essential not only for sustaining local and regional economies but also for supporting broader political and cultural structures. Consequently, Crete functioned as a conduit for economic, social, and political transmission, enabling the dissemination of technological innovations and sociocultural practices across the Mediterranean (Cline, 1994, 1999; Cline *&* Harris-Cline, 1998; Davies *&* Schofield, 1995; Hoffman, 1998; Jones, 2000; Laffineur *&* Greco, 2005).

In the case of Marmarica, its significance in a broader context stems from its unique geographical location. Marmarica serves as a pivotal point bridging several key regions: the Nile Valley to the east, Cyrenaica to the west, the eastern Mediterranean circuits to the north, and the interconnected oases of the hinterland to the south. Trade and exchange traversing Marmarica involved a diverse array of products, including agricultural goods (dates, wine, wheat, and barley), animals, and other items such as salt and leather, yet these networks facilitated more than the transportation of goods; they also enabled the movement of people and ideas (Wilson, 2012; Snape, 2003, 2013; Nielsen, 2017). Consequently, Marmarica also emerged as a critical nexus within the network of trade routes and cultural exchanges, with its geographical and environmental characteristics playing a fundamental role in uniting diverse regions across multiple spheres of interaction (Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Snape, 2013; Hulin, 2015).

Ultimately, what lies beneath this research is the recognition that these societies actively interacted with their environments to forge pathways of economic intensification, cultural connectivity, and social complexity. These negotiations were rarely linear or unidirectional. Instead, they involved continual adaptation, experimentation, and exchange, leaving distinct traces on the landscape —particularly in those locations where individuals would settle or interact. Far from being passive recipients of environmental pressures or internal and external influences, ancient communities in Crete and Marmarica emerged as active agents —innovating, collaborating, and reshaping their landscapes.

Therefore, despite their contrasts, it is argued that both Crete and Marmarica share a rich history of interconnectivity through maritime and overland routes facilitated by their respective ecological configurations along the ancient Libyan Sea. In Crete, steep mountain slopes and a temperate climate promoted cultivation in terraced or valley-based plots, while the island's coastline, currents, and winds enabled seafaring exchanges with the Eastern Mediterranean and North African coasts (Wachsmann *et al.*, 2009; Knapp *&* Demesticha, 2017; Gal, Saaroni *&* Cvikel, 2022; Gheorghiade *&* Spencer, 2024). In Marmarica, the availability of water and vegetation shaped life in semi-arid and arid landscapes and required special knowledge of how to handle these scarce resources (Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Snape, 2013; Nielsen, 2017; Vetter *&* Rieger, 2019; Rieger, 2019, 2023). These harsh conditions compelled adaptation from all living beings, emphasizing the importance of ecological niches. Thus, the topography, morphology, and geology of these regions created specific conditions in which human adaptation to these environments resulted in distinct human traces and impacts. Consequently, understanding

the specific physical and ecological contexts of both regions offers deeper insight into the historical trajectories of settlement, subsistence, and exchange that defined human-environment interactions between mainland and island communities.

Arguing against the assumption of environmental determinism —i.e., the idea that the physical environment (climate, geography, etc.) solely shapes human societies and their development—, these societies developed a variety of strategies and interaction networks that transformed their landscapes and laid the foundations for complex social structures. In essence, societies weren't just passively shaped by their environments; rather, they actively adapted and developed strategies to thrive despite environmental challenges. On Crete, agricultural surpluses, trade and external exchanges stimulated regional development, as evidenced by monumental architecture and political systems. In Marmarica, the use of water-harvesting systems and oases sustained life and fostered trade and exchange, while coastal sites played an equally pivotal role in multi-scalar economies. These dynamics highlight how environmental affordances, and human agency shaped the development of social, economic, cultural, and political networks along the ancient Libyan Sea. While the environment presents certain challenges and opportunities, human societies actively influence their development through innovation and adaptation, wherein trade, agriculture, and organization are interrelated and contribute to social complexity. Consequently, Crete and Marmarica serve as exemplars for exploring how different but interconnected regions utilized their unique environmental affordances and human conditions to develop resilient and complex societies.

1.3.3 State of Art

From a historiographical standpoint, foundational works on Mediterranean studies can be traced to historians such as Henri Pirenne and Fernand Braudel, who have shaped the field by providing frameworks that continue to influence contemporary literature. Henri Pirenne, with his work *Mohammed and Charlemagne* (1932/2019), was a pioneer in highlighting both the distinctiveness and the historical fragmentation of the Mediterranean at the dawn of the Middle Ages. His reflections opened avenues for subsequent explorations of how cultural, economic, and political factors shaped a region traditionally perceived as a cohesive maritime zone. Similarly, in *The Mediterranean and the Mediterranean World in the Age of Philip II* (1949/2019), Fernand Braudel introduced an innovative temporal framework by distinguishing between three historical "rhythms"—the *longue durée*, *conjunctures*, and *histoire événementielle*. Braudel's layered approach underscored the interplay of long-term environmental and geographical structures, intermediate socioeconomic cycles, and short-term political events, offering a multidimensional approach to historical analysis. This framework not only highlighted processes of continuity and rupture but also reshaped methodological approaches in Mediterranean studies.

In the field of Mediterranean historiography, Immanuel Wallerstein's world-systems theory (1974/2004) introduced a perspective that emphasizes how socioeconomic mechanisms influence the evolution of geopolitical and economic structures. Wallerstein's theory examines the hierarchical relationships within a systemic framework, focusing on the dynamics of integration, interaction, and exchange. The strength of this approach lies in its ability to provide a macro-historical perspective that highlights the

interconnectedness of societies and their roles within broader systems of exchange. His focus on center-periphery dynamics and the integration of local economies into transregional networks provides a valuable framework for analyzing the connections between different levels in both regional and interregional systems. This framework allows us to understand how local and regional developments are influenced by and contribute to larger global processes, offering a comprehensive view of Mediterranean interconnectedness.

Another key milestone within Mediterranean studies emerged with Horden and Purcell's *The Corrupting Sea: A Study of Mediterranean History* (2000). The value of their work lies in conceptualizing the Mediterranean as a multifaceted object of archaeological and historical investigation, providing a nuanced approach to understanding the region's complexity. They redefine seminal ideas by giving more weight to human agency, emphasizing the interplay between human decision-making and the conditioning forces of the physical environment. This approach rebalances Mediterranean historiography, moving beyond deterministic environmental frameworks to incorporate the dynamic and adaptive strategies of its inhabitants —i.e., the fluid interaction between nature and culture. Building upon this tradition, Cyprian Broodbank's *The Making of the Middle Sea: A History of the Mediterranean from the Beginning to the Emergence of the Classical World* (2013) significantly expands the chronological and conceptual scope of Mediterranean studies. Particularly this work emphases on the interwoven trajectories of maritime connectivity, social complexity, and ecological adaptation. Collectively, these works have spurred renewed interest in themes such as mobility, trade networks, and human-environment

interactions, influencing a broad spectrum of scholarship now broadly termed "Mediterranean Archaeology".

A parallel tradition of scholarship focusing specifically on the Eastern Mediterranean has its origins in the early twentieth century. This body of research has significantly influenced our understanding of the interconnectedness of ancient societies, emphasizing the importance of material culture, textual evidence, and maritime connections. Seminal works by scholars such as Hall (1913) and Evans (1921-1935) established the foundation for studying this subregion's unique historical dynamics. The 1930s marked the emergence of the first catalogs, such as that of John D. S. Pendlebury (1930), which underscored the significance of material culture as a means of reflecting the region's interconnected past. In the 1940s and 1950s, researchers like Helene Kantor (1947) and Jean Vercoutter (1956) advanced the thesis of extensive interconnections across the Aegean, the Near East, and Egypt, specifically drawing upon Egyptian textual and material evidence to illustrate the breadth and depth of these connections. The latter half of the twentieth century witnessed exponential growth in specialized studies, particularly from the 1970s onwards. Scholars such as Keith Branigan (1973); John Boardman (1980), Barry Kemp and Robert Merrillees (1980), Shelley Wachsmann (1987, 1998), Lambrou-Phillipson (1990, 1991), Stefano Stucchi (1991), Livingston V. Watrous (1992), Eric H. Cline (1994, 2010), Nanno Marinatos (1998), Paul Rehak (1998), Andrew and Susan Sherratt (1993, 2003, 2016, 2022), Arthur B. Knapp (1991, 2008, 2012, 2018, 2021), Cyprian Broodbank (2000); Jacqueline Phillips (2008), or Thomas F. Tartaron (2013); among others, have significantly expanded theoretical and methodological perspectives.

Within this broader narrative, the specific question of contacts between Crete and the Libyan-Egyptian coast has emerged as a valuable case study for examining the evolution of sociocultural interactions, trade routes, and settlement patterns within the Eastern Mediterranean basin. Some scholars have explored these connections through various approaches. Notably, the *Danaos Deep-Water Survey* (https://nauticalarch.org/projects/danaos-deep-water-survey/), which sought to reconstruct the ancient maritime passage between Crete and Egypt by locating and analyzing shipwrecks and jetsam on the seabed. This project provided interesting insights into ancient navigation and trade, emphasizing the importance of underwater archaeology in uncovering the material evidence of maritime connectivity (Wachsmann *et al.*, 2009). More recently, the adoption of advanced digital and computational analytical techniques, such as GIS-based analysis, has significantly enhanced the precision and scope of this research. These methods and techniques have facilitated a more nuanced understanding of the interactions between Crete and the Libyan-Egyptian coast, offering new perspectives on maritime networks and exchange. These include those by Gal, Saaroni, and Cvikel (2021a, 2021b, 2022), Gheorghiade *&* Spencer, (2024), or Daems and Danai (2025), which have demonstrated the potential of these approaches to elucidate patterns of connectivity.

In parallel, scholarly attention has increasingly focused on regional studies, which have significantly enriched our understanding of archaeological field data and its broader implications. In the context of Crete, numerous fieldwork projects have played a pivotal role in driving the evolution of the "Aegean archaeology" over decades, each contributing valuable insights into the island's complex archaeological landscape. Some examples include the

Knossos Urban Landscape Project, *Khania Archaeological Project*, *Sphakia Survey*, *a survey of the Western Messara Plain*, *Malia Survey*, *Vrokastro Survey Project*, *Sissi Archaeological Project*, *Khavania Archaeological Project*, *Gournia Survey Project*, *Archaeological Survey of the Kavousi Region*, *Pseira Survey*, *Petras/Achladia/Aghia Fotia Survey*, *Itanos Survey*, *Palaikastro Survey*, *Ziros Survey*, *Praisos Survey*, *Lasithi Survey*, *or the Ierapetra Survey* (see Figure 3.13) (Watrous, 1974; Blackman *&* Braningan, 1975, 1977; Hood *&* Smith, 1981; Sanders, 1982; MacGillivray *&* Sacket, 1984; Ince, Koukoulis *&* Smyth, 1986; Tsipopoulou, 1989; Haggis, 1990; Nixon *et al.,* 1990; Müller, 1990; Hope-Simpson *&* Betancourt, 1990; Hope-Simpson, Davaras *&* Betancourt, 2004, 2005; Hayden, Moody *&* Rackham, 1992; Whitley, Prent *&* Thorne, 1999; Watrous, Chatzē-Vallianou *&* Blitzer 2005; Watrous *et al.,* 2012; Chalikias *&* Oddo, 2019; among others).

On the Marmarica side, while field data remains comparatively limited, significant insights have been provided by pioneering works and research initiatives. Early foundational studies, such as those by Oric Bates (1914, 1915, 1927), established a baseline understanding of the region's historical and archaeological landscape. Subsequent contributions, including White (1986, 1996, 2002a, 2002b) and White and White (1996), have expanded upon these early works. Further studies include the fieldwork and surveys conducted by the University of Liverpool, led by Steven Snape, focused on the Marsa Matruh area (Hounsell, 2002; Simpson, 2002; Snape, 2003, 2013); the *Western Marmarica Coastal Survey* (Hulin, 1999, 2001, 2008; Hulin, Timby *&* Mutri, 2009; Hulin *et al.,* 2010), the *Eastern Marmarica Survey Project* (Vetter, Rieger *&* Nicolay, 2009; Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Rieger, 2017, 2019, 2023), the *NW Egyptian Marmarica Coast Survey*

(https://honorfrostfoundation.org/2021/08/05/nw-egyptian-marmarica-coast-survey-ongoing/), and big projects such as EAMENA (*Endangered Archaeology in the Middle East and North Africa*) (https://eamena.org/), or MAREA (*Maritime Endangered Archaeology*) (https://marea.soton.ac.uk/); among others, further enriched our knowledge of this region's historical dynamics (see Figure 3.27). These studies have provided accurate field data through systematic surveys, detailed excavation reports, analytical studies; or mapping vast parts of this region through digital research techniques. Through such approaches, these projects have established robust empirical foundations that not only enhance our understanding of this region but also facilitate comparative studies with other areas of the Eastern Mediterranean and North Africa.

Complementing these field-based endeavors, some digital projects have aggregated and disseminated archaeological and historical information on an unprecedented scale in more recent years. Initiatives such as Pleiades, Trismegistos, Topostext, or VICI have become interesting tools for researchers (https://pleiades.stoa.org/; https://www.trismegistos.org/index.php; https://topostext.org/; https://vici.org/. These platforms enable the visualization and analysis of spatial and temporal data. For instance, Pleiades offers detailed geospatial data on ancient places, while others such as Trismegistos aggregates textual records, linking epigraphic, papyrological, and archaeological evidence. Collectively, these initiatives underscore the dynamic interplay between traditional historiography and cutting-edge digital tools. These methodologies provide a framework for exploring the Mediterranean's interconnected history, setting the stage for future research that is both methodologically innovative and grounded in robust empirical data.

Consequently, recent scholarship has deepened our understanding of these connections by drawing on archaeological fieldwork, digital mapping projects, and interdisciplinary research approaches. Taken together, these methodological and analytical developments mark a shift in Eastern Mediterranean archaeological research —from broad theoretical models that emphasize macro-regional structures to increasingly granular, data-rich studies that attend to multi-scalar dynamics. Far from discarding the influential paradigms of foundational works, current archaeologists refine them by foregrounding the messy realities of localized practices and regional exchanges that coalesced into broader systems of interaction. This scholarship thus challenges earlier deterministic models of connectivity. In so doing, they return, in many aspects, to the historical rhythms that informs Braudel's temporal framework, but with a sharper appreciation of human agency and a wider array of digital and computational approaches.

In sum, the historiographical narrative of Crete–Marmarica interactions encapsulates many of the fundamental debates in Mediterranean studies — between notions of unity and fragmentation, local agency and environmental determinism, and multi-scalar systems *versus* regional specificity. Early monographs ignited discussions on the Mediterranean's capacity for connectivity; later theoretical works introduced models that highlight economic centers, peripheries, and cyclical patterns; and contemporary archaeological and digital initiatives have provided a refined, data analysis-driven perspective on how these theoretical constructs. Through the synthesis of the methodological strands, the research on Crete and Marmarica contacts stands poised to shed even more light on the complexities of Mediterranean connectivity and the ongoing evolution of historiography.

1.4 STRUCTURE & SUMMARY OF CHAPTERS

Following this introductory section, which conceptualizes the research and establishes the objectives, research questions, and initial hypothesis, as well as the geographical and historical settings, the dissertation is structured into seven additional chapters (Table 1.2). Each of them builds upon the preceding one with the aim of developing a comprehensive analysis of long-term socioecological dynamics and spatial complexities within archaeological landscapes, with a particular focus on the regions bordering the ancient Libyan Sea, namely Crete and Marmarica.

Capítulo II. Marco teórico - claves para una historia socioecológica. This chapter establishes the theoretical framework guiding this research, focusing on the interrelationship between landscapes, human-environment interactions, and social complexity from a long-term perspective. The chapter begins by exploring foundational concepts within landscape archaeology, such as "landscape", "place", or "habitat". This exploration helps situate archaeological sites within broader socio-environmental contexts and to address the fluid definitions of "site" within changing ecological and sociocultural frameworks. Furthermore, it shifts attention to the networks and scales through which past societies engaged with each other and their surroundings. Additionally, it presents ideas of complex systems thinking to delve into socioecological factors, supported by principles of human ecodynamics and historical ecology (HE). The chapter also examines epistemological and ethical considerations in research methodology and concludes by bridging theory with practical implementation, outlining the project's design and demonstrating how these approaches facilitate the study of social complexity.

Capítulo III: Interpretando la topografía arqueológica. This chapter marks the beginning of the Materials and Methods section of the dissertation, focusing on the methods and techniques employed to document, analyze, and interpret the landscapes under study. It provides an overview of how data modeling and advanced mapping techniques converge to create a detailed and dynamic understanding of archaeological landscapes. The chapter also details the sources, structuring, and organization of data, covering the trade-offs between customizing data models for specific research goals and adhering to established standards. Topics such as multi-scalar environmental and archaeological variables, managing incomplete or uncertain data, risk assessments, and the importance of open data are addressed. Additionally, the chapter examines aerial remote sensing techniques and presents the case studies of Crete and Marmarica, illustrating the practical application of these approaches in specific geographical contexts.

Capítulo IV: La complejidad espacial del paisaje arqueológico. This chapter delves into computational and quantitative modeling techniques for understanding spatial complexity in archaeological research. Through the integration of exploratory data analysis and predictive modeling, this chapter introduces how advanced computational methods can reveal the interplay between human and non-human factors that shape past landscapes. To do so, it discusses the role of quantification in archaeology, and the integration of computational models derived from machine learning and spatial analysis methods. The chapter concludes by presenting the results of these approaches on the case studies of Crete and Marmarica, identifying site distribution patterns and spatial correlations between human and environmental factors in landscape dynamics.

Capítulo V: Paisajes en movimiento – (Re)construyendo redes y dinámicas sociales. This chapter shifts the analytical focus to mobility, networks, and the social interactions that shape (and are shaped by) both human and non-human factors. It introduces concepts and techniques for reconstructing past movements, exploring how spatial networks operate at multiple scales — from local to global and micro to macro connections. The chapter also examines the significance of mobility routes and historical trajectories, employing GIS-based techniques for network reconstruction, such as accumulated cost-surface analyses. Additionally, it develops diverse spatial network models and explores network science metrics, applying these concepts to the case studies of Crete, Marmarica, and the broader connections along the ancient Libyan Sea. Through archaeological network research, the chapter aims to fully capture the dynamism and interconnectivity of sociospatial connections within the diverse landscapes, paving the way for deeper interpretations of how societies interact within and across their environmental and social contexts.

Capítulo VI: La importancia de la "apertura" en la investigación arqueológica. As the concluding chapter of the Materials and Methods section, this chapter examines the concept of "openness" in scientific inquiry, with a particular focus on how open science principles apply to archaeological research. By examining the context, definitions, and practical applications of open methodologies, this chapter highlights the ethical and significant dimensions of these practices. This section also differentiates between foundational concepts such as Open Data, Open Access, Open Methods, and others, supported by the FAIR and LOUD principles, which emphasize accessibility, transparency, and ethics in research. The chapter concludes with

a practical introspection exercise on implementing FAIR+LOUD practices in this research, aiming to demonstrate the benefits (and necessity) of openness in enhancing communication and transparency in research.

Chapter VII: Ordering Data, Narration in Play – Landscapes, Networks *&* Society Along the Ancient Libyan Sea. Serving as the Discussion section of this dissertation, this chapter synthesizes the theoretical perspectives, methodological approaches, and research results presented in the earlier chapters. It constructs a cohesive narrative that explores how landscapes, networks, and social complexity intersected along the ancient Libyan Sea. The chapter also focuses on the Cretan and Marmarican archaeological landscapes, emphasizing site distributions, diachronic patterns, mobility networks, and societal transitions. Additionally, it examines multi-scalar and multi-temporal sociospatial networks of interaction, illustrating the complex interconnectivity and socioecological trajectories that shaped both mainland and island communities within the broader contexts of the Mediterranean and North Africa worlds.

Chapter VIII: Concluding Remarks *&* Future Research. As the final chapter of the dissertation, this chapter presents the key interpretations, reflects on the exploratory nature of this research, and discusses its broader implications. It also addresses the theoretical and practical contributions of the study, acknowledges its limitations, and proposes future research directions. Furthermore, it emphasizes the integration of socioecological frameworks, complex systems modeling, and the necessity of a co-joint efforts between computational and field archaeology, as well as open science practices, advocating for inter- transdisciplinary archaeological research.

Table 1.2. Dissertation scheme, representing the correlation between objectives, research questions, and corresponding chapters.

Dissertation scheme			
Structure	Specific Objectives (SO)	Research Questions (RQ)	Chapter
Introduction			Chapter I
Theoretical Framework			Chapter II
Materials & Methods and Results	SO.1 Site distribution patterns	RQ1.1; RQ1.2; RQ1.3	Chapter III, IV
	SO.2 Human mobility and interaction networks	RQ2.1; RQ2.2; RQ2.3	Chapter V
	SO.3 Socioecological dynamics	RQ3.1; RQ3.2; RQ3.3	Chapter IV, V
	SO.4 Ethical research practices	RQ4.1; RQ4.2; RQ4.3	Chapter VI
Discussion			Chapter VII
Concluding Remarks & Future of research			Chapter VIII

II

MARCO TEÓRICO –
CLAVES PARA UNA HISTORIA SOCIOECOLÓGICA

II

MARCO TEÓRICO
CLAVES PARA UNA HISTORIA SOCIOECOLÓGICA

2.1 PAISAJES, INTERACCIÓN, COMPLEJIDAD

Alex Knodell, en su libro *Societies in transition in early Greece: an archaeological history*, introduce un marco de investigación basado en tres conceptos fundamentales para la arqueología: paisaje, interacción y complejidad (Knodell, 2021: 17). Estos tres conceptos clave constituyen la base central de esta investigación. Desde la perspectiva de "paisaje", este estudio examina los patrones de asentamiento y dinámicas regionales tanto en el Egeo (Creta) como en el noreste del África mediterránea (Marmárica), evaluando los posibles cambios que estos patrones han experimentado a lo largo del tiempo (*longue durée*). Desde la perspectiva de "interacción", se aborda cómo modelar y articular las redes históricas a diversas escalas —local, regional y larga distancia— que estructuraron y vincularon dichas regiones y comunidades. Y, finalmente, la perspectiva de "complejidad", unifica los aspectos anteriores, examinando la complejidad emergente de estas sociedades como resultado de dichas interacciones a través de los paisajes. Este estudio también considera las relaciones coevolutivas entre las comunidades humanas y su entorno, lo que sugiere un contexto complejo y dinámico donde fluyen de manera continua elementos materiales e inmateriales en constante cambio. Dichas interacciones no se limitan a lo físico, sino que también incluyen factores sociales y ecológicos, proporcionando así un marco de investigación holístico para la comprensión socioecológica e histórica de estas regiones.

2.1.1 Una Arqueología del Paisaje

Bases conceptuales y definición de paisaje

Este estudio parte de un marco conceptual global para entender el paisaje, considerándolo como una entidad compleja compuesta por múltiples elementos. Estos componentes incluyen tanto los agentes bióticos como abióticos, el entorno construido por el ser humano (p. ej., asentamientos, lugares de enterramiento, áreas productivas, etc.) y su percepción simbólica cultural (Trigger, 1967; Criado-Boado, 1988; Giacomorra, 2006; Van Dyke, 2014; Prendergast, 2015; David & Thomas, 2016; Knapp, 2018). Tal y como señala Carl Sauer en su obra *The Morphology of Landscape*, la dicotomía del paisaje como elemento "natural" o "cultural" ha sido superada por el reconocimiento de que los paisajes son el resultado de la interacción continua entre elementos naturales y la intervención humana (Sauer, 1925/1963). Considerar la temporalidad de las acciones que ocurren a través de los paisajes enriquece aún más esta definición, ya que añade un sentido histórico (Tello, 1999; Martín Civantos, 2011). Desde esta conceptualización, concebimos el paisaje desde una aproximación holística que integra a los humanos y al medioambiente o naturaleza ("no humanos", desde una perspectiva posthumanista) (Crellin & Harris, 2021), siendo el paisaje, por tanto, un artefacto histórico "biocultural" (Martín Civantos, 2018).

Utilizamos el término "medioambiente" o "naturaleza" de forma amplia e integradora, para excluir a los humanos. De este modo este término engloba el medio físico en su acepción geográfica, los elementos bióticos (excluyendo a los humanos) y los factores abióticos —atmósfera, topografía, corrientes de agua, pedogénesis del suelo, vegetación, etc.— (Martín Civantos, 2008). Es decir, en base a esta definición el medioambiente incluiría todos y cada uno

de los agentes no humanos. Por otro lado, también consideramos que los paisajes son artefactos antrópicos (Martín Civantos, 2008). Como señala Bruce G. Trigger toda relación y proceso social tiene un impacto y un reflejo en el paisaje (Trigger, 1967: 158). Además, los humanos socializan el paisaje, tanto comunitaria como individualmente, a través de diferentes dinámicas experienciales (Shanks *&* Tilley, 1987; Ingold, 1993; Ashmore *&* Knapp, 1999; Ashmore, 2007; Johnson, 2012; Egeler, 2019). Así, la acción humana, que es social y cultural, también forma parte del paisaje. Por tanto, los paisajes son sociales y culturales (Giacomorra, 2006: 34). Complementando esta afirmación está la temporalidad de los paisajes (McGovern, Hambrecht, *&* Hicks, 2019). Si los paisajes son reflejos de la acción humana a lo largo de la historia, entonces las acciones sociales en un lugar a lo largo del tiempo añaden diferentes modificaciones y adiciones al paisaje —i.e., son palimpsestos históricos (Ingold, 1993). Desde esta perspectiva, los paisajes son (en parte) la manifestación epidérmica de los cambios económicos, culturales y políticos; es decir, son históricos, culturales y socioeconómicos (Martín Civantos, 2008, 2011; Criado-Boado, 2017) y deben ser analizados a la *longue durée.*

Analizar los paisajes también requiere que nosotros —los arqueólogos/as— los miremos con "ojos ajenos", aparte de nuestra comprensión heredada del presente (la *Epoché* a la que se refiere Sørensen, 2017: 110). Los paisajes deben entenderse desde dentro; es decir, desde la perspectiva de las culturas que viven en ellos (Shanks *&* Tilley, 1987). Este enfoque resuena con el concepto de *Zeitgeist*, o "espíritu de su tiempo", un término originalmente utilizado por Johan W. von Goethe que subraya la importancia de entender que cada época tiene su propia configuración única de ideas, valores y circunstancias (Goethe, 1808/2016). Esto se debe a que cada sociedad fue influenciada por una serie de condiciones y factores circundantes, ya sean geográficos, ambientales,

sociales, culturales, etc. Estos factores tuvieron un impacto en las formas en que estas sociedades satisfacían sus necesidades básicas, obteniendo alimentos, refugio y seguridad, y además muestran cómo enfrentaban problemas y desafíos, desarrollando sus sistemas económicos, sociales y culturales (Abdollah, 2022: 5). En la década de 1950, el antropólogo Kenneth L. Pike fue el primero en emplear los términos *Emic* y *Etic*, al analizar los comportamientos desde una perspectiva interna o externa al sistema cultural, respectivamente. Desde entonces, estos términos se han popularizado en varios campos de la ciencia (véase Pike, 1954, 1990; Headland, Pike *&* Harris, 1990). La socialización humana de los paisajes es central en este estudio, debido a que se pretende comprender el paisaje desde la perspectiva de sus habitantes en el pasado. Esto está estrechamente relacionado con la referencia a las propiedades fenomenológicas, que son igualmente fundamentales.

La fenomenología surge del ámbito de la filosofía de la mano de Edmund Husserl y busca describir los fenómenos basándose en las estructuras de la experiencia y la conciencia humana, sin recurrir a interpretaciones o explicaciones externas (Husserl, 1913/2012). Este enfoque ganó reconocimiento en el ámbito de la investigación arqueológica durante la década de 1990 (Tilley, 1994), influido por el simbolismo postprocesual (Hodder, 1987). Sumándose al concepto de paisajes culturales, la fenomenología afirma que un paisaje no solo se usa y se transforma, sino que también se siente, se experimenta y se vive (Bruck, 2005; Van Dyke, 2014; Darvill, 2015; Prendergast, 2015). Al hacerlo, reconoce el papel de nuestros sentidos y nuestra cognición. Esto añade matices individuales, así como colectivos y subjetivos, a la comprensión de los paisajes, impregnándolos de simbolismo (Fauconnier *&* Turner, 2002; Herb *&* Derchain, 2008). Con esta subjetividad, la fenomenología enreda ambas dinámicas de sincronía y

diacronía: la primera porque existen diferentes perspectivas (ideológicas y cognitivas) sobre un paisaje en un momento histórico concreto; la segunda, porque la percepción y cognición del paisaje varía a través del tiempo. Desde una perspectiva ontológica, la fenomenología ayuda a alejarse de la lógica hegemónica actual al reconocer otras perspectivas no modernas (Criado-Boado, 1988).

A través de este enfoque también es posible explicar la articulación de historias, leyendas y creencias imbricadas en lugares concretos, o analizar el entorno construido. Este aspecto simbólico está mediado por la cognición en una interacción entre experiencias individuales y colectivas que modifican la comprensión humana de los lugares. Este es uno de los principales papeles analíticos —por ejemplo— de los paisajes celestes y sonoros, especialmente en lo que se refiere a los sentidos de la vista y el oído en relación con el paisaje (Cross & Watson, 2006; Scarre, 2006; Silva & Campion, 2015). De este modo, la fenomenología muestra cómo los paisajes son ideados (p. ej., las historias) o dotados de significado (p. ej., los elementos simbólicos) por los humanos. Y, al mismo tiempo, estos lugares, que permiten la articulación de leyendas o tradiciones, modelan la percepción de los humanos (Criado-Boado, 2017). Esto demuestra que los paisajes son, por tanto, materiales e inmateriales y nos obliga —como mencionábamos anteriormente— a observarlos a través de los ojos de las sociedades que estudiamos.

En definitiva, la fenomenología sostiene que los paisajes transmiten percepciones sensoriales tanto individuales como colectivas a los humanos. Estos, a su vez, articulan estas percepciones y atribuyen características, significados y valores específicos a estos paisajes. Este proceso constante, que involucra la participación activa de humanos y no humanos, es lo que permite

"socializar" el paisaje (Egeler, 2019). Dicho proceso hace que el paisaje sea "único" para diferentes culturas e incluso individuos (Ashmore & Knapp, 1999; Gunnell, 2019).

Hay un último aspecto que conecta sus propiedades culturales y temporales. Como se ha mencionado anteriormente, los paisajes reflejan las acciones humanas en el entorno. Muchas de estas acciones promueven el conocimiento cultural de ese mismo entorno. Este conocimiento es potencialmente un activo importante en nuestro presente porque nos permite aprender del pasado (McGovern, Hambrecht, & Hicks, 2019). Como se ha demostrado, es posible recuperar dicho conocimiento tradicional a través del análisis arqueológico y etnográfico (Martín Civantos, 2018; McGovern, Hambrecht, & Hicks, 2019). De ahí que pueda afirmarse que este proceso de recuperación de conocimiento convierte a los paisajes en aparatos conectivos entre diferentes periodos históricos; entre el pasado y el presente.

Es importante considerar que la geografía nos ofrece, además, una gran diversidad de paisajes, lo cual ha generado la aparición de numerosos términos relacionados para describirlos en la literatura científica. Estos hacen referencia principalmente a contextos terrestres (*landscape*), pero también costeros (*coastscape*) y marítimos (*seascape*) (Knodell, 2021: 18). Aunque el mar y la tierra tienen sus propias particularidades (véase Knapp (2018), para una exposición introductoria de los paisajes marítimos, especialmente en la cuenca Mediterránea), este marco de investigación no considera necesaria una separación conceptual, por lo que unifica bajo el término "paisaje" tanto los espacios terrestres como los costeros o marítimos. Este análisis etimológico refuerza la idea de que, aunque los paisajes pueden ser diversos, están unidos por el concepto subyacente de "espacio". El concepto de espacio tiene matices

en arqueología porque denota una "topología" indeterminada y desprovista de tiempo (Hodder, 1988). Dado que el estudio arqueológico de los paisajes se centra en las sociedades del pasado, es conveniente pasar del concepto de "espacio" al de "lugar", un espacio social aprehendido e imbuido de significado cultural (Casey, 1996; Criado-Boado & Santos, 1998; Hamerow, 2018; Egeler, 2019). De este modo, el enfoque aquí adoptado conceptualiza los paisajes como lugares, es decir, localizaciones inscritas con significado social y cultural (Hodder, 1988; Casey, 1996; Shapshay, Tenen & Nomikos, 2018; Egeler, 2019).

Sobre el concepto de lugar y hábitat (Heterotopía)

Según Matthias Egeler, un lugar no es simplemente una porción de espacio físico; es un espacio cargado de valor o simbolismo a través de las experiencias humanas, las prácticas culturales y las interacciones sociales (Egeler, 2019: 2). En esta misma línea, Edward S. Casey propone "un lugar es más un acontecimiento que una entidad asimilable a categorías conocidas. Como acontecimiento, es único, idiolocal" (Casey, 1996: 26). Esta idea desafía la visión de los lugares como entidades estáticas, físicas, que pueden clasificarse fácilmente en categorías predefinidas. En lugar de ello, se presentan como un "acontecimiento", reconociendo que los lugares son dinámicos y están en constante evolución, influenciados por las personas y experiencias que transcurren en ellos. Además, al mencionar que un lugar es "*idiolocal*", expresión que combina la raíz "*idios*" (propio o particular) y "*local*" (un lugar específico), sugiere que los lugares poseen características, significados o valores que son únicos a su localización y contexto, destacando su singularidad y carácter específico. Por otra parte, el "espacio" se caracteriza por un vacío y la falta de significado, conceptualizado como un contenedor o

un lienzo en blanco, que existe independientemente de la acción humana. El espacio es neutro y no posee intrínsecamente las cualidades o los valores que hacen que un lugar sea significativo para un individuo o comunidad. La transición de espacio a lugar ocurre cuando este espacio "vacío" es llenado de "significado", adquiriendo una identidad y valor reconocidos y compartidos por los individuos o comunidad (Harvey, 1996; Preucel & Meskell, 2007; Egeler, 2019).

Los humanos viven y transitan a través de sus paisajes, es decir, dentro de lugares conocidos dotados de valor y significado, sus hábitats. Sin embargo, la naturaleza del hábitat varía considerablemente en función de factores no humanos (ya sean orográficos, climáticos, etc.), reflejando así una diversidad de lugares a través del espacio y tiempo. El hábitat, desde una perspectiva ecológica, se define como el espacio en el que vive y se desarrolla una especie (Besson, 2017). Sin embargo, desde una visión biocultural esta definición se amplía para incluir tanto a los humanos como a los no humanos, considerando también el papel de la cognición y los hábitos en la configuración de los espacios (Rozzi, Massardo & Poole, 2020). Por lo tanto, el hábitat no debe pensarse únicamente a partir de la idea de un espacio vacío, un entorno, en el que vive un individuo o un grupo de individuos. Al contrario, aquí defendemos que la definición de hábitat debería incluir el papel de la cognición y de los hábitos como forma de comprender mejor la aproximación mental y experiencial de los humanos hacia sus hábitats (Rozzi, Massardo & Poole, 2020).

Consideremos, por ejemplo, un grupo de granjeros que habitaron las fértiles tierras de la llanura de Mesará al sur de Creta en torno al I milenio a.C.: su conceptualización del hábitat probablemente estaría compuesta por los

límites marcados por sus granjas, los caminos que tienen que atravesar y, presumiblemente, los caminos hacia otros lugares específicos, como otras zonas productivas, santuarios, lugares de enterramiento, etc. Esta visión podría diferir significativamente de nuestra percepción externa: un hábitat quizás definido simplemente por la granja y el campo. En este sentido, la *Epoché* fenomenológica promueve dejar de lado nuestras presuposiciones habituales, facilitando un acercamiento a los hábitats y, por extensión, a los paisajes de una forma distinta a lo que permitiría nuestro presentismo (Sørensen, 2017: 110).

El concepto de heterotopía enriquece aún más estas definiciones, describiendo cómo diversos lugares funcionan de manera distinta dentro de una sociedad, sirviendo incluso como contraposiciones o utopías realizadas. Acuñado por Michel Foucault (1967), este término describe lugares específicos considerados "otros", que reflejan, invierten o distorsionan las relaciones espaciales en las que existen. Estos espacios no solo adquieren "significado" reflejando normas y valores culturales, sino que también pueden desafiar, subvertir o replantear esos valores (Foucault, 1984, 1986; Vidler *et al.,* 2014). Por ejemplo, una zona de captación de agua (cisterna) en la región de Marmárica —caracterizada por paisajes generalmente áridos o semiáridos— actúa como heterotopía al contradecir las normas del contexto general donde se sitúa. Integrar el concepto de heterotopía permite ver los lugares no solo como espacios significativos, sino también como espacios que pueden cuestionar, alterar o amplificar nuestra percepción de la realidad. Así, un lugar se entiende como una ubicación que, además de tener un significado inscrito, establece una relación crítica o complementaria con el orden establecido.

Desde estas aproximaciones, estos lugares son relevantes no solo desde una perspectiva sistémica, sino también, y quizás más importante, desde enfoques fenomenológicos y de heterotopía. La primera nos hace considerar los espacios como partes de un sistema interconectado, enfocados en su función y relación con el entorno, promoviendo una comprensión estructurada de los hábitats. La segunda prioriza la subjetividad, valorando los lugares por cómo son percibidos y vividos, lo que determina su significado basado en las experiencias humanas. Y, finalmente, la tercera identifica espacios únicos que desafían lo convencional, funcionando de manera distinta, lo que permite reflejar, invertir o transformar normas y realidades establecidas. Siguiendo esta línea de argumentación, se podría llegar a afirmar que la forma de estos hábitats varía en base a la funcionalidad y las experiencias cotidianas de los individuos y las comunidades. Así, la forma de un hábitat no es necesariamente igual a la de otro: estos lugares están definidos por lo "conocido" y lo "desconocido-conocido". Esto da cuenta de lugares marcados por la realidad experimentada. Además, esta realidad influyó en la forma en que estas sociedades concebían los lugares en los que vivían.

Para comprender las pautas espaciales, por tanto, es esencial inferir cómo las sociedades concebían su paisaje, en interacción con los demás y con el mundo material. Podría decirse que este último enfoque es un esfuerzo propio de la arqueología cognitiva (Renfrew, 1993; Iliopoulos *&* Malafouris, 2014; Iliopoulos, 2019). En consecuencia, este estudio aplica una mirada fenomenológica y de heterotopía, pero incorpora también un enfoque cognitivo para comprender cómo las personas socializaban sus paisajes. Al aplicar estos enfoques al estudio de los paisajes modelados, esta perspectiva permite generar conocimiento situado (Iliopoulos *&* Malafouris, 2014; Iliopoulos, 2019). Esto significa que los lugares no tienen por qué ser un

escenario definido por vastas extensiones de —por ejemplo— desierto. Más bien, un lugar puede estar definido por contornos marcados por asentamientos, enterramientos, zonas de captación de recursos, o las rutas que interconectan estos lugares.

En suma, el paisaje, desde la arqueología del paisaje, sólo tiene pleno sentido entendido como el resultado de la acción humana sobre el medio físico en una interrelación dialéctica (Tello, 1999; Martín Civantos, 2008). Sin embargo, como ocurre con muchos de los autores citados hasta ahora, el grado de interacción entre humanos y no humanos queda a veces vagamente definido. En cualquier caso, podemos afirmar que el estudio de los paisajes entraña complejidad debido a su esencia. Los paisajes son complejos porque entrelazan dinámicas de diacronía, sincronía y agencia (Opitz, Nuninger *&* Fruchart, 2012; Criado-Boado, 2017; García-Contreras, 2019). También lo son desde la perspectiva de la fenomenología (Bruck, 2005; Van Dyke, 2014; Criado-Boado, 2017) y de heterotopía (Foucault, 1984, 1986; Vidler *et al.*, 2014). Finalmente, esta complejidad aumenta cuando añadimos la dimensionalidad del enredo social que conlleva el paisaje. Por esta razón, el paisaje no es una entidad "cerrada" con medidas exactas y se define mejor como un *sitio* arqueológico que hay que descifrar (Martín Civantos, 2007).

Definición de "sitio" arqueológico

Existe la necesidad (casi) continua de reevaluar conceptos clave que son ampliamente usados en arqueología, especialmente aquellos que por su dinamismo y complejidad han experimentado diversas redefiniciones a lo largo del desarrollo de la disciplina. Esto nos lleva a reflexionar sobre cómo se puede entender y definir el concepto de *sitio* arqueológico dentro del marco

teórico propuesto. El principal problema para conceptualizarlo es que, como categoría analítica, presenta diversas definiciones y aplicaciones, algunas incluso contradictorias (Herrera Malatesta, 2018: 25). La polisemia del término refleja la complejidad de los fenómenos estudiados y la diversidad de perspectivas metodológicas que se aplican. No obstante, desde la definición de paisaje que aquí se expone, el término adquiere una comprensión más amplia y matizada al considerar los sitios arqueológicos no solo como puntos estáticos, físicos en el espacio donde se encuentran restos materiales de las sociedades del pasado, sino como nodos marcados por la acumulación de actividades humanas a lo largo del tiempo (Binford, 1964; Ingold, 1993, 2017). Esto implica que un *sitio* arqueológico puede ser entendido como una manifestación del lugar donde se han concentrado y entrelazado diversas experiencias humanas, dejando tras de sí un registro material que puede ser estudiado (Ingold, 1993; Herrera Malatesta, 2018).

Por lo tanto, podemos identificar un *sitio* arqueológico no como una unidad de análisis estática, sino dinámica a través del tiempo. Este carácter dinámico se debe también a la aparición de otros procesos naturales, tales como procesos de sedimentación, o de formación (tafonómicos) (Schiffer, 1987; Rossignol, 1992). Otro aspecto de importancia a reconocer es la variación interna dentro de los sitios arqueológicos, tanto en términos de materialidad como de funcionalidad (Herrera Malatesta, 2018). Esta observación es crucial, ya que desafía la noción de que estos sitios puedan ser considerados como unidades homogéneas. La variabilidad material y funcional indica que diferentes áreas dentro de un mismo *sitio* arqueológico pueden requerir diferentes aproximaciones.

La introducción de otros conceptos relacionados como "*off-site*" (Foley, 1981) y "*non-site*" (Hurst Thomas, 1975) permiten además aportar una comprensión más completa de las dinámicas humanas y su relación con el entorno. Estos conceptos subrayan la necesidad de considerar no solo los lugares de actividad intensiva, sino también las áreas entre estos núcleos de actividad (Øye, 2009). Es decir, espacios aparentemente "vacíos", marginales o no utilizados, que juntos conforman el tejido completo del paisaje habitado. Con respecto al primero de los casos (*off-site*), nos proporciona una mirada más allá de los límites tradicionales de los sitios arqueológicos incluyendo áreas de dispersión de artefactos o ecofactos, tales como antiguas vías de tránsito, zonas productivas o de captación de recursos, y otros indicadores del uso humano del espacio que no se concentran en un punto específico (Foley, 1981; Bintliff *&* Snodgrass, 1988; Haas, 2012). Por su parte, el segundo de los términos (*non-site*), propone un enfoque para la exploración y distribución de evidencia arqueológica a lo largo de la topografía, desplazando el interés desde las concentraciones de materiales o estructuras hacia la identificación de patrones de variabilidad espacial a través del paisaje. Esta aproximación sugiere también otros lugares como evidencia, resultado de áreas de actividad pasadas (Hurst Thomas, 1975; Dunnell *&* Dancey, 1983; Herrera Malatesta, 2018). Tales propuestas desafían los límites del concepto tradicional de *sitio* arqueológico y promueven una comprensión más matizada de la interacción humana con el medio, donde la variabilidad topográfica y la distribución de los recursos juegan un papel fundamental.

Estas aproximaciones son fundamentales para una interpretación holística del paisaje arqueológico, ampliando nuestro entendimiento sobre cómo las sociedades pasadas interactuaban con su entorno (Knitter, Bebermeier *&* Nakoinz, 2015). Esta perspectiva insta a reevaluar y valorar todas las formas

de actividad humana, independientemente de su densidad o visibilidad inmediata. Por tanto, la noción de que las acciones humanas dejan un "rastro" en el paisaje se refiere a cómo estas actividades, a través de su repetición en el tiempo y el espacio, generan patrones que pueden ser observados y analizados. Según Tim Ingold, las actividades humanas no deben entenderse como acciones aisladas, sino como parte de una red interconectada de prácticas que se entrelazan con el entorno físico y social a lo largo del tiempo (véase Ingold, 1993; 2017, para una definición más completa de lo que denominó como "*taskscapes*"). Estos patrones no son arbitrarios; reflejan la intencionalidad y necesidad, en definitiva, los modos de vida de las sociedades que habitaban y transitaban estos lugares.

Desde esta perspectiva, la definición de *sitio* arqueológico se amplía para incluir no solo la presencia física de artefactos, ecofactos o estructuras arqueológicas, sino también la red de interacciones humanas con el entorno y la materialidad que las representa. Esto significa reconocer tanto los lugares de actividad intensiva como aquellos espacios intermedios que, aunque pueden parecer marginales, son fundamentales para comprender la complejidad de las interacciones humanas. Así, un *sitio* arqueológico se convierte en un punto de acceso para comprender cómo los humanos han habitado y modelado su paisaje, reflejando tanto la espacialidad como la temporalidad de sus prácticas. De este modo, al considerar los sitios arqueológicos como expresiones de las dinámicas entre los humanos y no humanos, se revelan las formas en que esta interacción continua ha dado forma al paisaje a lo largo de la historia.

2.1.2 Una Arqueología de la Interacción

Interacción

Denis Retaillé afirma "los lugares son móviles, efímeros y cambiantes; reaparecen... El movimiento es su primera cualidad" (Retaillé, 2013: 68). Esta observación subraya la importancia del movimiento, tanto en su dimensión física como conceptual, en la configuración y percepción de los lugares y experiencias humanas. Esto se debe a que las sociedades siempre han interactuado de manera dinámica con su entorno, estableciendo una interdependencia que varía en función del contexto temporal, espacial y social. El movimiento es un componente fundamental de estas interacciones, tanto dentro de un mismo lugar como en la conexión entre diferentes lugares. Para cualquier individuo o comunidad, los distintos medios de desplazamiento en su entorno han permitido una gran variedad de acciones y experiencias. Es por esto por lo que los senderos, caminos y rutas históricas representan estructuras esenciales del paisaje humano (Barnard *&* Wendrich, 2008; Snead, Erickson *&* Darling, 2011; Beaudry *&* Parno, 2013). Comprender los factores que impulsan estos desplazamientos y los agentes que los configuran es esencial para estudiar las sociedades del pasado.

Aquí se explora un enfoque para comprender estos desplazamientos a través de los paisajes desde una perspectiva arqueológica. Al hacerlo, se pone en práctica toda una serie de herramientas conceptuales y métodos para rastrear patrones de interacción históricos. En este contexto, profundizar sobre el concepto de movimiento —como componente esencial de la interacción— puede permitir comprender mejor por qué las personas decidieron desplazarse en el pasado, considerando, además, las dinámicas medioambientales, socioeconómicas, políticas y/o culturales. Para ello, se

analizan las implicaciones del concepto de movimiento basándonos en la comprensión contemporánea del término. Según la Real Academia Española (RAE, 2024), se define como "acción y efecto de mover…estado de los cuerpos mientras cambian de lugar o de posición". Esta definición proporciona un punto de partida, destacando el aspecto o dimensión física del concepto. No obstante, para obtener una perspectiva más rica y matizada del término, se ha consultado además su definición en diversos contextos lingüísticos. En particular, se destacan las entradas 1.a, 1.d, 1.e, 1.f, 1.h, 7.a y 8.a proporcionadas por el *Oxford English Dictionary* (2024), que atribuyen las siguientes acepciones asociadas al término en inglés:

> 1.a: Acción o efecto de moverse; cambio de posición; paso de un lugar a otro, o de una situación a otra.
>
> 1.d: Cambio de posición de una fuerza militar, especialmente por razones tácticas o estratégicas; una maniobra.
>
> 1.e: Viaje, comisión u otra actividad significativa emprendida por una persona o grupo de personas.
>
> 1.f: Transporte de ganado, mercancías, personas, etc.
>
> 1.h: Salida o llegada de un vehículo, barco, etc.
>
> 7.a: La forma en que los acontecimientos o las condiciones se están moviendo en un momento o en una esfera particular; una tendencia en un período o ámbito determinados.
>
> 8.a: Una serie de acciones y esfuerzos por parte de un grupo de personas que trabajan para conseguir un objetivo común; una organización, coalición o alianza de personas.

Ninguna de estas definiciones por sí misma se ajusta exactamente a nuestro planteamiento, y las dos últimas bien podrían ser más aplicables a los

desencadenantes estacionales de un movimiento o corriente de pensamiento. No obstante, la combinación de todas estas definiciones se ajusta y enriquece nuestras aproximaciones. Ya que esta investigación se centra específicamente en rastrear y modelar el movimiento de personas, bienes e ideas, con el objetivo de elaborar un relato diacrónico de los posibles flujos regionales y suprarregionales generados por los intercambios socioeconómicos y socioculturales de las distintas comunidades que habitaron las regiones situadas en torno al Mar de Libia desde la segunda mitad del II milenio a.C. hasta el I milenio d.C. Dichos desplazamientos entre distintos lugares pueden ser estacionales, temporales o incluso permanentes (1.a, 1.d y 1.e), e implican el movimiento de elementos materiales e inmateriales —objetos, otros agentes biológicos, ideas, etc.— de una región a otra (1.f y 1.h). De ello se deduce que tales movimientos se producen en el paisaje e implican una multiplicidad de factores.

A partir de la conceptualización del movimiento como elemento fundamental de la interacción, se puede vincular directamente con la discusión sobre la interacción como un proceso dinámico y distribuido que involucra tanto a agentes humanos y no humanos (Knappett, 2011). Esta perspectiva permite explorar cómo los desplazamientos físicos —evidenciados materialmente en senderos, caminos y rutas históricas— posibilitan la conexión entre diferentes lugares y son el resultado de decisiones individuales o colectivas, creando una variedad de experiencias a través de prácticas sociales y culturales (Gibson, 2006). Así, la movilidad histórica, como práctica espacial, es tanto física como social y simbólica. La noción de espacialidad es fundamental para entender cómo las interacciones configuran y son configuradas por la relación continua entre diversos factores. La espacialidad —siguiendo esta argumentación— trasciende la mera existencia física de un espacio, implicando también cómo

este es percibido, experimentado y alterado por quienes lo habitan, en una interrelación continua con el entorno. Así, este concepto subraya la necesidad de considerar tanto las dimensiones materiales como las inmateriales al analizar procesos de interacción a través de los paisajes (Knappett, 2011).

Para conectar cómo estos diferentes agentes o factores coexisten e interactúan para formar complejos sistemas interrelacionados, se introduce el concepto de "*assemblages*" (adaptación inglesa del término en francés "*ensemble*" o "conjunto" en español). Originado en la filosofía de Deleuze y Guattari (1980), este término se refiere a configuraciones complejas y heterogéneas de relaciones "enredadas" entre diversos componentes, tanto humanos como no humanos. Estos sistemas interrelacionados son fluidos y dinámicos, y se adaptan con el tiempo, influyendo en la creación y reconfiguración de espacios físicos y sociales (Deleuze & Guattari, 1987; Hayles, 2016; Hamilakis, 2017; Nail, 2017; Conway, 2021).

Para tratar de ilustrar esta visión, volvamos al ejemplo del sistema histórico de captación de agua en la región de Marmárica. Este sistema, unido a una serie de estructuras construidas para el aprovechamiento y distribución de recursos hídricos en un entorno generalmente caracterizado por su aridez, no solo transformó el paisaje físico al facilitar el acceso al agua en un entorno con recursos limitados, sino que también reconfiguró las prácticas sociales que al mismo tiempo se entrelazan con los elementos naturales. En consecuencia, estas interacciones modelan el paisaje habitado, destacando la naturaleza interconectada y la influencia mutua entre lo social (humanos) y el entorno (no humanos).

Redes

Tal como se ha argumentado, las interacciones humanas son inherentemente dinámicas, distribuidas e incluyen una multiplicidad de factores. Esto implica la necesidad de un enfoque analítico que metodológicamente sea capaz de abordar tal complejidad para entender cómo los procesos de interacción moldean la identidad de diversas comunidades (Gibson, 2006). Ante este desafío, surge una cuestión fundamental: ¿cómo se pueden integrar esta diversidad de factores? Una posible respuesta es a través de un enfoque de red (Knappett, 2011; Kohler, 2012; Tartaron, 2013; Knodell, 2021). El enfoque de red ofrece la capacidad de integrar múltiples dimensiones al analizar los paisajes, considerando tanto elementos físicos como sociales. Además, facilita la conexión de lugares, individuos y materialidad como elementos interconectados de una misma realidad (Knappett, 2011).

La descripción proporcionada resuena con los principios de la Teoría del Actor-Red (ANT, por sus siglas en inglés) (Latour, 2006), que considera tanto a los actores humanos como no humanos (incluyendo objetos y tecnologías) como agentes activos en redes de relaciones. Según la ANT, la agencia —i.e., la capacidad de actuar y efectuar cambios— emerge de la interacción entre estos actores, desafiando las distinciones tradicionales entre sujeto y objeto. Esta perspectiva invita a reconsiderar nuestra comprensión de la interacción, subrayando la importancia de las relaciones entre entidades humanas y no humanas en la configuración de la realidad social. Además, la expansión de este marco teórico permite explorar cómo estos enfoques facilitan una comprensión de la co-creación y co-actuación en diversos contextos, desde la innovación tecnológica hasta las cuestiones ambientales, donde la relación

entre los aspectos sociales y ecológicos son centrales (Soja, 1996; Thrift, 1996, 2005; Desilvey, 2006, 2007; Wilford, 2008; Knappett, 2011). Esto último es especialmente relevante cuando se trata de entender diferentes dominios ontológicos como redes contingentes —i.e., redes que se forman y reconfiguran constantemente a través de la interacción de sus componentes—, lo cual representa esencialmente un enfoque basado en el pensamiento en red.

El pensamiento en red enlaza directamente con el concepto de "investigación de redes", que abarca cualquier estudio arqueológico que adopte explícitamente una perspectiva relacional, desarrolle aspectos del pensamiento en red o emplee métodos formales de redes (Brughmans *&* Laguna-Palma, 2023: 12). Así como también al concepto de "ciencia de redes", el cual se refiere, de manera más específica, "al estudio de la recopilación, gestión, análisis, interpretación y representación de datos de red" (Brandes *et al.*, 2013: 2). En esencia, las redes ofrecen metodológicamente la capacidad de abstraer entidades (nodos) y representar cómo estas se encuentran interconectadas o relacionadas entre sí (enlaces), representando categorías analíticas que los arqueólogos/as deben definir previamente (Brughmans, 2010, 2013; Brughmans *&* Peeples, 2018, 2020, 2023; Brughmans *et al.*, 2023; Brughmans *&* Laguna-Palma, 2023). Este enfoque facilita la articulación de secuencias, escalas, comunidades y materialidad, permitiendo establecer relaciones concretas entre entidades (Sindbæk, 2007; Graham, 2009; Knappett, 2011, 2013; Brughmans, 2010, 2013; Mills, 2017; Brughmans *et al.*, 2023; Brughmans *&* Peeples, 2018, 2020, 2023; Brughmans *&* Laguna-Palma, 2023). Además, proporciona una perspectiva dinámica y diacrónica, reconociendo que estas redes no son estáticas y permitiendo la simulación de múltiples procesos relacionales (Knappett, 2011; Knodell, 2021; Brughmans *&* Peeples,

2023; Brughmans *et al.*, 2023; Brughmans & Laguna-Palma, 2023). Estas aproximaciones son cruciales para comprender aspectos subyacentes a las entidades, así como para facilitar la reconstrucción de procesos de interacción dentro de los paisajes de las comunidades que investigamos.

La investigación de redes, no obstante, no es exclusiva de la disciplina arqueológica, ya que, originalmente, en campos como las matemáticas (teoría de grafos), la física y, especialmente, la sociología (análisis de redes sociales —SNA por sus siglas en inglés—), esta subdisciplina tuvo un importante desarrollo desde la década de 1960. Esto ha provocado que, en la actualidad, se encuentren diversos términos relacionados en la literatura especializada, tales como "análisis de redes", "análisis de redes sociales", "redes complejas" o "ciencia de redes", aunque el uso de cada uno de ellos responde a diferentes casuísticas (Brughmans & Laguna-Palma, 2023: 13). En lo que respecta a la investigación de redes en arqueología, a pesar de que a lo largo del desarrollo de la disciplina se han realizado estudios cuyo principal interés ha sido la comprensión de las interacciones humano-ambientales o socioeconómicas (p. ej., Wallerstein, 1974; Irwin-Williams, 1977, pionero en el estudio del comercio prehistórico a través de modelos de redes; Horden & Purcell, 2000; McCormick, 2001; Broodbank, 2000, 2013), no ha sido hasta las últimas décadas que este enfoque se ha consolidado como una línea distintiva de la investigación arqueológica (Grau Mira, 2003, 2004, 2005; Sindbæk, 2007; Isaksen, 2008; Knappett, Evans & Rivers, 2008, 2011; Graham, 2009; Brughmans, 2010, 2013; Knappett, 2013; Östborn & Gerding, 2014, 2015, 2023; Collar *et al.*, 2015; Mills, 2017; Brughmans & Peeples, 2018, 2020, 2023; De Soto, 2019; Donnellan, 2020; De Soto & Carreras, 2021; Knodell, 2021; Rawat *et al.*, 2021; Brughmans *et al.*, 2023; Brughmans & Laguna-Palma, 2023; Mickel, 2016; entre otros).

A pesar de su potencialidad, sin embargo, estos enfoques no han quedado exentos de algunas críticas. Existen algunas discrepancias al asumir que las conexiones dentro de una red determinada pueden ser inherentemente sociales (Graham, 2006: 48). En otras palabras, conectar dos puntos a través de enlaces no implica necesariamente una relación, ni tampoco que demuestre una relación social (Brughmans & Laguna-Palma, 2023). Cabe destacar que esta crítica también se aplica de forma generalizada al ámbito de las tecnologías geoespaciales (p. ej., los Sistemas de Información Geográfica, comúnmente conocidos como SIG) (Hugget, 2015). Estas tecnologías han sido cuestionadas por su determinismo, debido a que aparentemente rinden el espacio desde un enfoque estático, bidimensional y cenital, del que podría decirse que se reduce simplemente a representar puntos y relaciones espaciales (Knappet, 2011; Parcero-Oubiña, 2018; Donnellan, 2020). Este enfoque crítico se inserta dentro de un debate más amplio sobre las tecnologías digitales, las cuales se argumenta promueven un razonamiento informatizado en lugar de un procedimiento interpretativo (Citter, 2019). Como con cualquier otra técnica formal, es crucial que los arqueólogos/as mantengan una perspectiva crítica y dejen que su comprensión de los datos y la teoría oriente su elección hacia el enfoque más adecuado.

Por otro lado, el verdadero valor de la investigación de redes radica en su capacidad para abordar y representar explícitamente las hipótesis relacionales que frecuentemente se plantean en arqueología, ofreciendo un amplio repertorio de términos como "centralidad", "comunidades", "agrupación", "rutas", etc. —i.e., brinda acceso a todo un campo de estudio enfocado en describir cualquier tipo de configuración estructural relacional. Así, los conceptos derivados de la investigación de redes dotan de herramientas para representar, describir y comunicar

estas configuraciones de manera muy detallada (Brughmans & Laguna-Palma, 2023). Aunque lo que realmente destaca de estos enfoques, más allá de proporcionar meramente un amplio vocabulario de términos estructurales, es su capacidad para "conectar" diversas entidades —tanto materiales como inmateriales— sin establecer necesariamente jerarquías entre ellas (Knappett, 2011; Knodell, 2021). Además, estos métodos facilitan la conexión entre diferentes elementos sin las segregaciones artificiales que podrían dividir los datos "subjetivos" de los "objetivos" (p. ej., la relevancia de determinados asentamientos en contraposición a la presencia de ciertas tipologías de materiales arqueológicos) (Graham, 2006; Knappett, 2011; Foxhall, Herring & Whitehouse, 2015). Este enfoque heterárquico proporciona una estructura para reconstruir fenómenos sociales mediante la conexión explícita de personas, objetos y lugares a través del espacio físico y social. Dentro de este marco, donde la interpretación y el conocimiento contextual orientan el uso de los datos, las redes despliegan su potencial para explicar la dimensión socioespacial de las interacciones humanas.

Es importante destacar que la conectividad trasciende la mera acción de enlazar dos elementos o actores. Desde esta perspectiva, engloba igualmente los medios de transporte, la movilidad y el intercambio de bienes, personas e ideas (Skeates, 2009; Leidwanger & Knappett, 2018). En cierto modo, esta definición contempla la interdependencia entre comunidades, las cuales están condicionadas por un contexto geográfico, socioeconómico y político determinado (Cherry & Leppard, 2014). Pero, ¿cómo es posible acercarse a la conectividad en el pasado? Desde un enfoque metodológico, los conceptos clave son "interacción", "redes" y, finalmente, "escala". Ya se han examinado las dos primeras dimensiones y ahora avanzamos hacia la tercera.

Escala

Al reflexionar sobre el componente espacial del paisaje, ya sea desde una perspectiva absoluta y física o desde un enfoque más dinámico y relacional como construcción social, nos encontramos inevitablemente con la cuestión de la escala. Emma Blake introdujo la idea de que la creación de lugares, junto con el concepto de sinecismo —i.e., la tendencia hacia la aglomeración o coalescencia (unión) de asentamientos—, constituye una manifestación de la espacialidad social que se extiende desde lo individual hasta lo global. Esta perspectiva subraya la naturaleza intrínsecamente espacial del paisaje, en el cual todos los aspectos de la vida se desarrollan a través de múltiples escalas (Blake, 2002: 154). Esto conlleva una comprensión más detallada de cómo las dinámicas a nivel micro, meso y macro están interconectadas y se influencian mutuamente de manera continuada (Blake, 2002, 2004; Knappett, 2011; Vis, 2018).

De hecho, existe una amplia gama de teorías que examinan estas cuestiones con el objetivo de comprender tales interacciones a través de diversas escalas. Algunos ejemplos de ello son la teoría y/o análisis de los sistemas-mundo (Kardulias & Hall, 2008), enfoques interaccionistas relacionados como los propuestos por Sherratt (1997) o Kristiansen y Larsson (2006); así como la perspectiva interregional de Stein (2002), que contempla las diferentes escalas promoviendo una interacción bidireccional (tanto de abajo arriba como de arriba abajo). Lo que subyace a estas propuestas es la búsqueda de un equilibrio de las dinámicas entre diversas escalas (Knappett, 2011). Sin embargo, esta problemática requiere de una aproximación que no solo sea capaz de operar a través de estas escalas, sino que también reconozca la

diversidad y heterogeneidad inherentes a la complejidad social (Callon & Law, 2004; Hetherington, 2004; Thrift, 2006; Knappett, 2011).

Por tanto, es necesario adoptar un enfoque que utilice categorías de análisis específicas, las cuales deben ser suficientemente flexibles para examinar la heterogeneidad y la interacción de diversos factores tanto dentro como entre diversas escalas, respetando al mismo tiempo las continuidades transescalares (Knappett, 2011). Esta argumentación reconduce metodológicamente de nuevo hacia el empleo de redes. En primer lugar, las redes exigen considerar las relaciones entre distintas entidades. En segundo lugar, son inherentemente espaciales, brindando la capacidad de representar tanto las relaciones sociales como físicas. En tercer lugar, las redes ofrecen un método efectivo para articular diversas escalas. En cuarto lugar, permiten incorporar individuos, comunidades y materialidad. Finalmente, y no menos importante, incluyen la dimensión temporal, lo que significa que las redes pueden revelar de manera dinámica complejidades y patrones a lo largo del tiempo (Knappet, 2011: 10).

En definitiva, la organización del espacio se concibe como un espacio en red. Este espacio está construido sobre múltiples flujos materiales e inmateriales canalizados a través de diversas redes de intercambio y comunicación. Estas redes operan a diferentes escalas, desde lo local hasta lo global, y se superponen unas a otras en el espacio. Este entramado facilita el flujo de bienes, personas e ideas, creando un complejo sistema de interdependencias que sustenta las organizaciones socioecológicas e históricas (Daems, 2021; Knodell, 2021). Tal definición no niega otros aspectos del paisaje, al contrario, distintos aspectos se solapan entre sí, imponiendo lógicas y diversos razonamientos (p. ej., en términos duales: verticalidad frente a horizontalidad;

continuidad frente a discontinuidad; global frente a local). Esta superposición de dimensiones resalta la necesidad de una perspectiva que permita abordar la complejidad inherente al paisaje y, por extensión, implica adoptar un enfoque de sistemas complejos.

2.1.3 Una Arqueología de la Complejidad

Complejidad social

De manera tradicional, las sociedades complejas se han definido por ser aquellas que presentan diversos niveles de jerarquía social, así como una clara distribución, diferenciación de roles y especialización entre los individuos que las componen (Childe, 1950; Adams, 1966; Binford, 1968; Bintliff, 1991, 1997; Tilly, 1992; Renfrew, 1994; Crumley, 1995; Trigger, 1998; Chapman, 2003, 2007; Kristiansen & Larsson, 2006; Barton, 2014; Daems, 2021; Knodell, 2021; entre otros). Este grado de diferenciación funcional en las sociedades puede ser tanto vertical como horizontal; la complejidad vertical es la estructura jerárquica con grados de concentración en la toma de decisiones y poder, mientras que la complejidad horizontal es la diferenciación de una sociedad en varios roles o subgrupos (Feinman, 2012: 36). La idea que subyace a esta definición es que las sociedades complejas exhiben una estructura organizativa, donde las funciones y posiciones sociales están claramente delineadas y distribuidas entre sus miembros (Daems, 2021). Aunque la complejidad suele atribuirse a formaciones sociales estatales, este concepto debe ampliarse para integrar también a otros modos de organización sociopolítica (Chapman, 2003, 2007; Trigger, 2003; Smith, 2011). Esto implica un cambio de paradigma que permite reconocer que la complejidad social puede manifestarse a través de diferentes estructuras, no limitándose solo a aquellas con un sistema estatal claramente definido, sino partiendo de la idea

de que cualquier sociedad presenta igualmente características de complejidad organizativa y social.

La complejidad social, entendida desde una perspectiva histórica, es intrínsecamente fluida y dinámica, lo que indica que las estructuras sociales y las relaciones entre sus miembros están en constante cambio (Knodell, 2021: 26). Por lo tanto, las estructuras y relaciones dentro de las sociedades no son estáticas, sino que evolucionan con el tiempo como respuesta adaptativa a nuevas circunstancias y desafíos (Pardo-Gordó, 2017). Vinculado a la idea de tiempo y cambio, Fernand Braudel introdujo conceptualmente tres escalas que dividen el tiempo histórico: *longue durée* (larga duración), *conjoncture* (coyuntura) e *histoire événementielle* (historia de los acontecimientos) (Braudel, 1949/2019). Estas categorías permiten analizar los cambios sociales en diferentes escalas temporales, desde los procesos que afectan a las estructuras a largo plazo, pasando por ciclos y tendencias intermedios a medio plazo, hasta eventos y crisis que ocurren a corto plazo. De ahí la importancia de considerar múltiples escalas temporales para entender los procesos de interacción, la complejidad social y sus dinámicas de cambio (Knappett, 2011).

Los estudios arqueológicos que abordan estas cuestiones se han centrado principalmente en comprender cómo las interacciones dentro de un sistema social pueden dar lugar a nuevos comportamientos emergentes (Bintliff, 1997; Chapman, 2003, 2007; Pardo-Gordó, 2017; Knodell *&* Leppard, 2018; Daems, 2021). Este enfoque sugiere que estas interacciones tienen el potencial de generar nuevas características del sistema que no son predecibles simplemente si examinamos sus componentes de forma individual y solo es posible a través de la combinación de las partes que integran dicho sistema (Martin *&* Sunley, 2007; Mitchell, 2009; Bernabeu Aubán, Moreno Martín *&*

Barton, 2012). Esto implica el reconocimiento de que las sociedades se organizan en formas que son internamente diversas y complejas, pero que logran mantener cierto grado de cohesión e integración (Barton, 2014). Igualmente, un tema fundamental es entender cómo se desarrolla y mantiene la desigualdad social dentro de dichos sistemas. Esto está relacionado intrínsecamente con la capacidad de determinados grupos o individuos de manipular las estructuras internas, lo cual implica que las relaciones de poder y la distribución de recursos están fuertemente vinculadas con el desarrollo de la desigualdad social (Knodell, 2021: 26). Esto puede llevar a la creación de sistemas de estratificación social que se manifiesten a través del tiempo, no solo por la fuerza o la coacción, sino también mediante la normalización cultural de ciertas prácticas y creencias que justifican la desigualdad.

Una comprensión más matizada de estas definiciones, destaca también otras características inherentes como son la no linealidad y la multidireccionalidad (Pardo-Gordó, 2017; Daems, 2021). La primera reconoce la idea de que los cambios efectuados en cualquier parte del sistema no son proporcionales ni directamente predecibles (p. ej., un cambio menor puede provocar consecuencias mayores en el sistema) (Pardo-Gordó, 2017: 11), mostrando que las relaciones causa-efecto no son simples ni directas (Barton, 2014). La segunda implica que los desarrollos sociales pueden avanzar en diferentes direcciones y no siguen un único patrón de progreso hacia una mayor complejidad (Freeberg, Dunbar & Ord, 2012). Esta tendencia a la evolución en constante cambio es el resultado de la adaptabilidad y la autoorganización de las sociedades como respuesta al entorno y a las interacciones con otros componentes del sistema (Bernabeu Aubán, Moreno Martín & Barton, 2012; Pardo-Gordó, 2017: 11). En este sentido, las sociedades tienden a volverse más complejas, o cambiar de manera imprevista, desafiando la idea de un

desarrollo lineal. Esto se debe a que la complejidad está relacionada con múltiples dimensiones, como la presión medioambiental, crecimiento demográfico, innovación y transferencia tecnológica, conflictos, excedente productivo, redistribución, estructura social, niveles de desigualdad, interacciones, etc. (Daems, 2021: 2). Así, la complejidad debe entenderse en una escala no lineal y variable, sugiriendo que no hay una única forma de medir o de que sea definida, sino que es un proceso continuo de reorganización, influenciado por una variedad de factores tanto cualitativos como cuantitativos, internos y externos. Esto requiere de un enfoque analítico que parta de la interacción como elemento central de la transmisión y luego detalle cómo emergen las estructuras organizativas y las dinámicas sociales.

Sistemas Complejos

Los sistemas complejos son aquellos que se caracterizan por presentar complejidad (Pardo-Gordó, 2017; Daems, 2021). Aunque difícil de definir, la complejidad puede describirse como la convergencia de una pluralidad de propiedades: comportamiento no lineal, autoorganización, emergencia, adaptación, no equilibrio, interdependencias entre los componentes de un sistema, procesamiento de información, etc. (Daems, 2021: 35). Así pues, cualquier sistema complejo posee estas propiedades, aunque el grado de complejidad puede variar dentro del sistema y la escala. Cuanto más complejo es un sistema, más niveles organizativos presenta (Pardo-Gordó, 2017: 10). Es importante señalar que los sistemas complejos se adaptan a lo largo del tiempo debido al constante intercambio de retroalimentación y procesamiento de sus componentes (Bernabeu Aubán, Moreno Martín *&* Barton, 2012; Barton, 2014). Por esta razón, los sistemas complejos pueden considerarse

sistemas adaptativos complejos (CAS, por sus siglas en inglés) (Barton, 2014; Pardo-Gordó, 2017; Daems, 2021).

La idea fundamental es que los CAS son "sistemas abiertos" donde agrupaciones de agentes se caracterizan por la interdependencia y la retroalimentación entre sus componentes y el entorno de formas que pueden resultar en comportamientos colectivos complejos, impredecibles y emergentes (Lewin, 1992; Bentley, 2003; Bentley *&* Maschner, 2003, 2007; Mitchell, 2009; Bernabeu Aubán, Moreno Martín *&* Barton, 2012; Barton, 2014; Pardo-Gordó, 2017; Daems, 2021). Estos sistemas son adaptativos, lo que significa que tienen la capacidad de cambiar y aprender de la experiencia, lo que les permite evolucionar con el tiempo (Barton, 2014; Daems, 2021). La aplicación de esta teoría al estudio de las sociedades del pasado sugiere que estas pueden ser entendidas como CAS, donde las interacciones entre sus miembros y el entorno pueden llevar a la emergencia de comportamientos colectivos y evolutivos (Barton, 2014; Pardo-Gordó, 2017). Esto implica que, para comprender la evolución de estas sociedades, es necesario adoptar un enfoque que considere tanto las dinámicas internas como las influencias externas y cómo estas continuas interacciones dieron lugar a determinados patrones sociales a lo largo del tiempo.

La base epistémica de dicha teoría beneficia claramente nuestras aproximaciones. No obstante, a pesar de su potencial como marco explicativo, aplicar el marco de los CAS al registro arqueológico supone, como mínimo, un reto (Barton, 2014: 5). Esto se debe a que considerar las sociedades desde esta perspectiva implica tener en cuenta aspectos como el flujo de información, la toma de decisiones, las interacciones a múltiples escalas y las dinámicas no lineales en las que la acción social genera fenómenos emergentes

a nivel de sistema (Barton, 2014; Pardo-Gordó, 2017). Identificar estos fenómenos, las interacciones no lineales y su impacto en las dinámicas sociales a través del tiempo resulta realmente complejo cuando se trabaja a partir de la materialidad, debido a que normalmente el registro arqueológico es fragmentario y discontinuo.

El principal reto, por tanto, reside en cómo rastrear y explicar las cadenas de causalidad no lineales, donde las relaciones de causa y efecto no son directas ni predecibles, sino que pueden involucrar diversos factores y retroalimentaciones que cambian en el tiempo y el espacio (Pardo-Gordó, 2017). Estas cadenas de causalidad reflejan cómo las interacciones a pequeña escala (entre individuos) pueden influir en dinámicas a gran escala (cambios en las sociedades o en los ecosistemas). Estas estructuras emergentes no son simplemente la suma de las partes individuales, sino algo cualitativa y cuantitativamente distinto que surge de la interacción de diversos factores tanto internos como externos (Laguna-Palma *&* Barruezo-Vaquero, 2023). En el contexto de la investigación arqueológica, esto implica entender cómo las interacciones entre individuos, comunidades y el ambiente biofísico pueden generar patrones complejos y emergentes a nivel de sistemas socioecológicos (Bentley *&* Maschner, 2003, 2007; Barton, 2014).

El pensamiento de Sistemas Complejos

La aplicabilidad de los enfoques anteriormente expuestos no solo es útil para estudiar internamente las organizaciones sociales humanas, sino también para todos los sistemas dinámicos, ya que estos pueden conceptualizarse como redes estructuradas (*complex networks*) (Barabási, 2002; 2012; Pardo-Gordó, 2017). Esto implica la posibilidad de aplicar estos

planteamientos a estudios comparativos, en los que fenómenos que pueden estudiarse bajo condiciones controladas pueden servir como sistemas modelo para ayudar a comprender mejor dinámicas de cooperación, competencia, formación de redes e interacción social (Barton, 2014). Esto significa que los conceptos derivados de los sistemas complejos ofrecen un marco para comprender cómo los sistemas compuestos por múltiples elementos interconectados pueden exhibir comportamientos complejos emergentes a partir de procesos de interacción (Salva-Pardó, 2017). En consecuencia, es necesario desplegar una serie de herramientas metodológicas que nos permitan modelar y simular dichos procesos, permitiendo a los arqueólogos/as explorar cómo diferentes variables y condiciones pueden influir en el desarrollo de los sistemas sociales evolutivamente.

Dentro de este marco, los sistemas complejos pueden ser concebidos como conjuntos de redes que interactúan, produciendo comportamientos emergentes (Pardo-Gordó, 2017; Daems, 2021; Knodell, 2021). Por lo tanto, estas interacciones dinámicas dentro de las sociedades humanas pueden ser modeladas y comprendidas a través de métodos de ciencia de redes (Barabási, 2002, 2012; Brughmans, 2010, 2013; Bernabeu Aubán, Moreno Martín & Barton, 2012; Thurner, Hanel & Klimek, 2018; Brughmans & Peeples, 2018, 2023; Brughmans *et al.*, 2023). Las redes nos permiten representar de manera estructurada cómo los individuos, grupos o comunidades sociales se conectan e interactúan entre sí, teniendo en cuenta, además, los distintos condicionamientos geográficos y ambientales.

Pensemos, por ejemplo, en cómo los análisis y modelos generados en el marco de esta investigación integran zonas ecológicas, orografía, asentamientos, zonas históricas de captación de recursos, cuencas hidrográficas, etc. Ninguno

de estos elementos, aislado, puede representar completamente la estructura espacial y organizativa que presentan estas regiones y las sociedades que habitaban en ellas. Es más bien la combinación sumatoria (no linealidad) de todos ellos, analizados de forma horizontal (heterárquica), lo que permite que podamos comprender, a través de la interacción, los patrones, dinámicas y comportamientos sociales a lo largo del tiempo.

Esto implica que esta investigación se centre en representar y explicar cómo los agentes están interconectados entre sí y cómo estas conexiones influencian el comportamiento global del sistema (Bentley *&* Maschner, 2003, 2007; Chapman, 2007; Bernabeu Aubán, Moreno Martín *&* Barton, 2012; Feinman, 2012; Barton, 2014; Pardo-Gordó, 2017; Daems, 2021; Knodell, 2021, entre otros). Un enfoque de este tipo apunta a entender las interacciones como el entrelazamiento (agencia mutua) de agentes humanos y no humanos, incluso en contextos en los que los humanos son, *a priori*, los que deciden por razones socioeconómicas (Laguna-Palma *&* Barruezo-Vaquero, 2023). Del mismo modo, estas aproximaciones mejoran la comprensión sobre cómo estos procesos de interacción influyeron en la organización social, espacial y económica de las regiones analizadas. Además, esta perspectiva promueve un análisis del paisaje multiescalar sin privilegiar lo local sobre lo global (o viceversa) (Knappett, 2011), favoreciendo el estudio de las dinámicas complejas que den cuenta del entrelazamiento sistémico de los diversos factores sociales y ecológicos, y su evolución a lo largo del tiempo.

2.2 EL PAPEL DE LOS FACTORES SOCIOECOLÓGICOS

2.2.1 Ecodinámicas Humanas y Ecología Histórica

Desde que James McGlade acuñó el término de "ecodinámicas humanas" en la década de 1990, este concepto no ha dejado de ganar adeptos en el ámbito de la investigación arqueológica. La propia definición del término implica el interés por el estudio de las interrelaciones históricas y a largo plazo entre los humanos y no humanos (medioambiente o naturaleza) a través del espacio-tiempo, evaluando la agencia que ambas entidades ejercen la una sobre la otra (McGlade, 1995). En otras palabras, el objetivo de este enfoque es analizar y comprender el sistema o sistemas socionaturales (Harrison & Maher, 2014). Desarrollado de forma paralela, y relacionado con la ecología cultural definida por Julian Steward desde la antropología en la década de 1950, nace también del interés por comprender las interrelaciones a largo plazo entre los humanos y el entorno, el concepto de "ecología histórica" por Carole Crumley (1994). De manera similar a las ecodinámicas humanas, la ecología histórica se centra en el estudio de la dinámica coevolutiva y dialéctica entre agentes humanos y no humanos, en la que la agencia de los no humanos ejerce su influencia tanto sobre ellos mismos como sobre los humanos y viceversa (Crumley, 1994). Estas interrelaciones mutuas y "enredadas" facilitan el desarrollo de estructuras socioecológicas y sociohistóricas, que funcionan a diferentes escalas espaciales, temporales y sistémicas (Fitzhugh *et al.*, 2018; Marquardt, 2019).

Aunque cada uno de estos enfoques tiene su propia perspectiva y aproximaciones metodológicas, podría decirse que son complementarios si se consideran sus objetivos: el estudio sintético e histórico de las interacciones humano-ambientales. Además, ambos reúnen una serie de características que

pueden implementarse de forma complementaria, concretamente para comprender los paisajes como la manifestación espacial de dichas interacciones (Fitzhugh *et al.*, 2018; Sinclair, Moen *&* Crumley, 2018; Ray, 2019). De hecho, proponen un marco que comparte una comprensión común de la dinámica no lineal/agencia heterárquica para trazar tales interrelaciones desde una perspectiva a largo plazo (Crumley, 1994, 2017, 2019, 2021; McGlade, 1995; Balèe, 1998, 2006; Harrison *&* Maher, 2014; Fitzhugh *et al.*, 2018). Si acaso, podría argumentarse que la ecología histórica se preocupa por entender cómo las sociedades humanas se han adaptado a su entorno y lo han modificado en función de sus necesidades a lo largo del tiempo —i.e., la ecología histórica estudia las ecodinámicas humanas. Pero, en cualquier caso, estos enfoques convergen (Kirch, 2005). Por esta razón, y en aras de la simplicidad, en adelante se utilizará normalmente "EH" para englobar bajo un mismo término tanto las ecodinámicas humanas como la ecología histórica.

2.2.2 Explorando los principios fundamentales de la "EH": relaciones enredadas

Uno de los pilares fundamentales que establece la EH es el reconocimiento de las relaciones "enredadas" entre agentes humanos y no humanos (Marquardt, 2019). Tales interacciones complejas tienen implicaciones significativas para entender los paisajes (la manifestación espacial de tales relaciones) como lugares donde las interrelaciones entre diferentes agentes se entrelazan de manera continua (Eriksson *et al.*, 2018). La idea de "enredo" también reviste importancia porque permite integrar otros conceptos, como son la agencia mutua, la no linealidad y la heterarquía (Laguna-Palma *&* Barruezo-Vaquero, 2023). Al incorporar estos conceptos

clave a la investigación arqueológica, se obtiene una comprensión más completa y matizada de la interrelación continua entre las comunidades humanas y su entorno. Esta comprensión es esencial para ofrecer una visión sobre cómo evolucionan y se adaptan estas relaciones en respuesta a las cambiantes condiciones socioecológicas a lo largo del tiempo.

Agencia mutua

Estas interrelaciones entre los agentes del sistema biofísico de la Tierra explican el funcionamiento de los sistemas socionaturales. Como afirma McGlade, "las estructuras se mantienen solo mediante un intercambio constante de energía/materia y entropía, en el que la acción de las retroalimentaciones positivas de los procesos ambientales y culturales impulsan al sistema hacia nuevos estados evolutivos, que a su vez proporcionan las condiciones para la renovación de una mayor producción de entropía" (McGlade, 1995: 124). Dicho de otro modo, la EH hace hincapié en la interconexión entre los agentes humanos y no humanos de un sistema, y en cómo se moldean e influyen mutuamente a través de constantes intercambios y circuitos de retroalimentación. Al adoptar esta perspectiva, este enfoque nos proporciona una comprensión más matizada y amplia de las complejas interacciones que se producen en los sistemas socionaturales, ofreciendo una visión de cómo estos evolucionan y se adaptan en respuesta a las cambiantes condiciones ambientales y socioculturales.

De ahí que el análisis de los sistemas socionaturales requiera concebirlos como sistemas complejos en los que cada componente puede interactuar potencialmente con todos los demás. Esto tiene implicaciones tanto epistemológicas como ontológicas. Siguiendo a Alice Ingerson, se debería

entender la dicotomía cultura/naturaleza como "variaciones cuantitativas a lo largo de un único espectro más que como una dicotomía de lo uno o lo otro [que, como consecuencia,] nos exige disociar cualidades y características tradicionalmente etiquetadas como "sociales" o "naturales" (Ingerson, 1994: 5). El concepto de agencia mutua es especialmente adecuado en este contexto. La agencia mutua —i.e., la capacidad de influir y ser influenciados— implica que los humanos y los no humanos están profundamente interconectados. De hecho, según Andrew M. Bauer, es a través del reconocimiento de esa bidireccionalidad que podemos entender el entrelazamiento ontológico entre ambos agentes (Bauer, 2018; también, Bauer *&* Ellis, 2018). Además, dicha mutualidad por medio de conexiones bidireccionales permite que el sistema cambie y, por tanto, evolucione. Así, la sinergia entre humanos y no humanos impulsa dinámicas coevolutivas, lo que lleva a argumentar que la historia podría conceptualizarse como la coevolución de diversos agentes (Harrison *&* Maer, 2014: 2-3; Fitzhugh *et al.*, 2018).

Para comprender tal sinergia, este enfoque incorpora una aproximación basada en los sistemas adaptativos complejos (los CAS mencionados anteriormente). El enfoque de los CAS no se sitúa tanto en los agentes *per sé* cómo en la visión holística derivada de los procesos de interacción, cambio y patrones de comportamiento a múltiples escalas (Sinclair, Moen *&* Crumley, 2018). Esto significa poner el foco en cómo los procesos de interacción, cambio y los patrones de comportamiento emergen de la colectividad de los agentes operando a múltiples escalas, en lugar de solo a través de las acciones de los agentes de manera aislada. Estas interacciones y sus mecanismos son, por tanto, de interés; aunque otros dos conceptos de la EH, pueden ser útiles para describirlas: la no linealidad y la heterarquía.

No linealidad

La EH aplica un razonamiento basado en la dinámica no lineal de la causalidad (McGlade, 1995). Los sistemas dinámicos complejos, como los socioculturales o bioculturales, tienen la capacidad de generar comportamientos emergentes impredecibles a través de retroalimentaciones no lineales, especialmente caóticas (Pardo-Gordó, 2017). Una consecuencia directa es que la dinámica sistémica de causalidad no es lineal ni simple, sino que depende de múltiples factores según el espacio, el tiempo y la escala de análisis. Como tal, "la estructura del ecosistema se considera una serie de conjuntos débilmente acoplados dentro de procesos que implican interacción biótica [...] y factores abióticos [...], donde los acoplamientos no lineales de estos procesos se vuelven aún más complejos por la acción humana" (McGlade, 1995: 121).

El enfoque de las explicaciones causales es fundamental para interpretar como los diversos agentes están interconectados. La no linealidad explica la dinámica entrelazada de los sistemas complejos, donde los cambios no son proporcionales ni directamente predecibles a partir de las condiciones iniciales o las intervenciones, ofreciendo una comprensión más matizada y completa de las interacciones que se producen en los sistemas socionaturales (Winterhalder, 1994; McGlade, 1995; Harrison *&* Maher, 2014: 2). Podría decirse que la no linealidad es uno de los principios fundamentales que rigen la acción mutua de los componentes tanto sociales (humanos) como ambientales (no humanos).

Heterarquía

Si la no linealidad rige las interrelaciones entre los humanos y su entorno, la heterarquía es el tipo de organización que define el carácter de dichas relaciones (Crumley, 1994, 1995, 2005). La heterarquía es un tipo de organización dentro de los sistemas complejos donde los elementos pueden ser clasificados o desclasificados (en relación con otros elementos) de diversas formas en función de las necesidades sistémicas, creando una estructura dinámica en la que el poder y la influencia se distribuyen entre varios agentes (Crumley, 1994: 12). Esto contrasta con una organización jerárquica, en la que los elementos se clasifican en un orden fijo. En una heterarquía, la importancia relativa y el comportamiento de los agentes, ya sean humanos o no, no son constantes, sino que fluctúan en función del contexto espacial y temporal, dando lugar a una estructura flexible y adaptativa de las interrelaciones entre los humanos y su entorno.

Como se mencionó anteriormente, las interrelaciones bidireccionales no lineales involucran a múltiples agentes que operan dentro de los sistemas complejos a través de diversas escalas espaciales y temporales (McGlade, 1995; Harrison & Maher, 2014). El poder que los agentes (sean humanos o no) pueden ejercer sobre los demás no es estático, sino variable; en ocasiones, pueden ser "estimuladores/dominantes" o "receptores/dominados" (Crumley, 2019: 293). En consecuencia, sus acciones, interacciones y resultados fluctúan en respuesta a circunstancias cambiantes, dando lugar a un sistema sensible al contexto y adaptable.

Multiescalar: perspectiva a largo plazo y a gran escala (distribuida)

Los investigadores/as que aplican estas aproximaciones destacan la importancia de utilizar datos arqueológicos y medioambientales multiescalares para obtener una comprensión integral multitemporal y multiescalar de las interrelaciones entre las comunidades humanas y su entorno (McGovern, Hambrecht *&* Hicks, 2019; Ray, 2019; Hambrecht *et al.*, 2020). Según este enfoque, el paisaje es la unidad de análisis fundamental a partir de la cual se desarrolla un marco que incluye sitios distribuidos (geográficamente dispersos) a escala local, regional e interregional, así como longitudinales y multitemporales (*longue durée*) —i.e., un enfoque sobre el paisaje arqueológico a diferentes escalas y perspectivas temporales. La acuñación de la frase conceptual "red de observación distribuida del pasado" (DONOP, por sus siglas en inglés) engloba este enfoque: "mediante el análisis de diversos conjuntos de datos, tenemos el potencial de acceder a registros a largo plazo de interacciones humanas con sistemas naturales en una amplia variedad de escalas temporales y espaciales y, de este modo, tanto reconstruir las condiciones medioambientales del pasado como revelar las dimensiones humanas en estos procesos" (Hambrecht *et al.*, 2020: 219).

La incorporación de diferentes escalas espaciales, desde la micro o local hasta la macro o interregional, mejora la comprensión de las interrelaciones históricas entre distintos agentes (Hambrecht *et al.*, 2020). Sin embargo, es importante señalar que la inclusión no significa descontextualización. Por el contrario, es necesaria una perspectiva comparativa e inclusiva que preste especial atención a cada contexto para desplegar análisis coherentes. Multiescalar significa, pues, integrar diferentes cartografías dentro de una

misma narrativa para proporcionar conocimientos históricos y diacrónicos de las relaciones entre los humanos y su entorno (Ray, 2019).

Un ejemplo práctico de la aplicabilidad de estos principios teóricos se observa claramente en las regiones y comunidades que habitaron en torno al Mar de Libia, donde se evidencia una continua relación entre aquellas poblaciones que desarrollaron un modo de vida más sedentario y aquellas más móviles. Esta dualidad sirve para mostrar cómo, a pesar de que diversos grupos empleaban diferentes estrategias adaptadas a entornos específicos, estas se encontraban profundamente interrelacionadas. Las poblaciones seminómadas se desplazaban estacionalmente en busca de alimento para su ganado, a través de rutas migratorias y la gestión de recursos hídricos limitados. En contraste, las comunidades sedentarias se encontraban asentadas en zonas que facilitaban una agricultura más estable. La interacción continua entre estas dos poblaciones, a través del comercio y el intercambio de conocimientos, formaba parte de un sistema socioecológico complejo, donde las interacciones y relaciones continuas y evolutivas entre estas comunidades y su entorno produjeron características y dinámicas que no pueden entenderse simplemente observando a cada grupo o agente de manera aislada. Este enfoque nos permite, además, considerar otros aspectos clave, como la dinámica no lineal, donde pequeños cambios (p. ej., un período de escasez de recursos, conflictos, etc.) pueden tener grandes efectos; y las relaciones heterárquicas, donde las relaciones de poder (p. ej., cooperación e intercambios entre comunidades) son fluidas y cambiantes. Al incorporar estos conceptos, se obtiene una comprensión más completa y matizada de cómo las interrelaciones entre las comunidades humanas y su entorno evolucionan y se reconfiguran como respuesta adaptativa a lo largo del tiempo.

2.3 CONSIDERACIONES EPISTEMOLÓGICAS & ÉTICAS: UNA BREVE REFLEXIÓN SOBRE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Tal como se ha descrito en las secciones anteriores, esta investigación se fundamenta principalmente en la arqueología del paisaje, enriqueciéndose además con la inclusión de principios derivados de las ecodinámicas humanas, la ecología histórica (EH) y el pensamiento en red. Todos estos enfoques convergen bajo un marco integrador desde una perspectiva que aborda el estudio de los sistemas complejos, subrayando como pilar fundamental de los objetivos y preguntas de investigación: los procesos de interacción. Estos procesos no se producen en el vacío o en un entorno aislado, sino a través de los paisajes. La comprensión conceptual del paisaje es, por tanto, fundamental. Se afronta este desafío mediante un enfoque ontológico, que permite trascender la visión del paisaje como mera agrupación de elementos físicos. Esta perspectiva permite concebir el paisaje como una red dinámica de relaciones entre diversos componentes. Podría decirse que todos estos factores están interconectados, enredados, como en una red. Por este motivo, se visualiza el paisaje como una red compuesta por múltiples y distintos elementos presentes de una misma realidad (Kowalczyk, 2020).

Otros conceptos aportados como la agencia mutua, la no linealidad, y los análisis multiescalares son aspectos clave que deben tenerse en cuenta. La no linealidad es un componente esencial de la agencia mutua, en la que numerosos agentes interactúan entre sí a ritmos variables dentro de un entorno en constante cambio. La forma en que se entienden y analizan estas interacciones puede cambiar en función de la escala de análisis que se decida

aplicar. Por lo tanto, el estudio de los sistemas complejos, como los co-desarrollos humano-ambientales, requiere de un marco capaz de articular diversos agentes en un enfoque multiescalar (Winterhalder, 1994; Knappett, 2011; Marquardt, 2019; Knodell, 2021). Desde un punto de vista metodológico, esto significa ampliar la mirada desde la escala micro o regional hacia una escala integradora de paisajes. De hecho, es una cuestión de escala; se necesita escalar el acercamiento a los paisajes desde la perspectiva de las sociedades que los habitaron. Este giro pretende romper fronteras *ad hoc*, territorios, etc. (Orejas, 1998). Esto implica la integración de datos y elementos que a menudo se dejan de lado (Opitz, Nuninger & Fruchart, 2012). No obstante, al ampliar nuestra lente pueden surgir mayores problemas porque complejizamos la aproximación a los paisajes; en cambio, se obtiene una visión más completa de los lugares y sociedades que analizamos.

Otro concepto fundamental es la comprensión de la heterarquía como elemento clave para entender la organización y dinámica de los sistemas socionaturales, en contraposición a los modelos jerárquicos tradicionales. Los modelos jerárquicos estrictos suelen enfrentar dificultades al intentar explicar la dinámica interna de los sistemas complejos, debido a su naturaleza estática y lineal. Estos modelos asignan categorías o valores fijos para explicar el funcionamiento de los agentes dentro de un sistema, lo cual podría no reflejar adecuadamente la complejidad real de las interacciones y procesos. Esto resulta problemático para comprender cadenas de causalidad dinámicas y multidimensionales (Crumley, 1994: 13, 1995, 2005). En un marco basado en el planteamiento heterárquico, la importancia de cada agente variará según el contexto espacio-temporal y el grado de libertad para actuar en ese contexto (Marquardt, 2019). Esto sugiere un enfoque más dinámico y adaptable para analizar los paisajes. Así pues, cualquier marco que pretenda articular dichas

interacciones deberá desarrollar interrelaciones mutables entre las escalas de análisis, reconociendo la importancia del contexto y la capacidad de agencia de los elementos o agentes involucrados.

La heterarquía también es aplicable al uso de diversas disciplinas, métodos y técnicas. En lugar de considerarse una divergencia insalvable, la diversidad puede verse como una oportunidad para desplegar una investigación holística (Crumley, 2019). En contraste con las barreras disciplinarias, en este estudio se ha propuesto utilizar todos los medios necesarios que puedan funcionar para resolver un problema específico, dependiendo del contexto y de las fuentes de información disponibles (Crumley, 1994; Meyer *&* Crumley, 2011). Esta visión heterárquica concibe las diversas aproximaciones no como cajas cerradas, sino como "conjuntos de herramientas entrelazadas" (Crumley, 2017: 567). Pensar las diversas disciplinas, técnicas y métodos como una "caja de herramientas" puede abrir la posibilidad de trabajar dentro de marcos transdisciplinares (Acosta Naranjo *&* Domínguez, 2014; Lethbridge *&* Hartman, 2016). Esto supone la necesidad de un enfoque consiliente capaz de fusionar fuentes, datos de distinta naturaleza y métodos entre diversas disciplinas (Daems, 2021: 10). El estudio de los paisajes, por tanto, requiere de un marco de investigación holístico, que además permita investigar en escalas temporales de larga duración (Fairclough, 2012; Fleming, 2012; Feinman, 2012; Fernández Fernández, Alonso González *&* Navajas Corral, 2015). De este modo, un marco transdisciplinar para el análisis de los paisajes debería abarcar todas las herramientas, métodos y fuentes disponibles, los cuales deberían gestionarse de forma coherente para comprender los paisajes en función de preguntas de investigación específicas.

Aunque no se haya mencionado con anterioridad, es importante destacar que estas aproximaciones también están comprometidas con la generación de resultados sociales (Redman *et al.,* 2004; Costanza, Graumlich *&* Steffen, 2007; Biggs, Schlüter *&* Schoon, 2015; Crumley, 2019). Este compromiso nace de la consideración de que comprender los ecosistemas desde una perspectiva histórica, no lineal y compleja podría generar percepciones aplicables a nuestro presente (Crumley, 2019; Ray, 2019; Hambrecht *et al.,* 2020). La idea central es que un análisis comparativo de los registros a largo plazo sobre las interacciones de los sistemas humano-ambientales podría contribuir significativamente al esfuerzo por entender y responder ante los cambios y amenazas actuales, tanto antropogénicas como medioambientales (Hambrecht *et al.,* 2020).

En respuesta a estos objetivos, esta investigación también incorpora modelos de gestión de datos que conectan todo el espectro de acciones y herramientas utilizadas para identificar, describir, evaluar y compartir datos e información de forma segura sustentando el principio de preservación (digital) del patrimonio arqueológico y cultural de las regiones estudiadas. Otro ejemplo es como este estudio resalta formas de desplazamiento en el pasado, que mayormente son impensables en el contexto globalista actual. Los patrones de movilidad identificados sugieren la posibilidad de transitar por paisajes en entornos adversos sin generar cambios insostenibles en el ecosistema. Así pues, el desplazamiento humano puede realizarse sin que sea degradante hacia el medioambiente, sino mediante actitudes más flexibles y sostenibles: el desarrollo de la sociedad debe avanzar conjuntamente con su ecosistema.

De igual modo, este estudio propone la búsqueda de prácticas éticas inspiradas en los principios de la "ciencia abierta" (*Open Science*). La ciencia

abierta es un movimiento que promueve la accesibilidad, la colaboración, la participación y la transparencia en la investigación, asegurando que el conocimiento científico sea libremente accesible (Toscano, 2021). Con este propósito, se han empleado herramientas digitales y enfoques computacionales que permiten cumplir con los estándares de "datos abiertos" (*Open Data*). Este esfuerzo se asienta sobre tres pilares fundamentales: accesibilidad, datos (FAIR y LOUD) y metodologías abiertas (Marwick *et al.*, 2017).

Al reconocer los datos de investigación como un bien público, se hace hincapié en que deben estar libremente disponibles en lugar de ser acaparados mediante dinámicas monopolísticas. Esto también concuerda con la consideración epistemológica de que la accesibilidad parcial a los datos sesga nuestra investigación y el conocimiento que generamos. Compartir los datos permite hacer frente a esta problemática al tiempo que refuerza la investigación informada, ya que los datos abiertos facilitan la interacción disciplinaria mediante el uso y la reutilización de la información y garantizan la transparencia a través del examen y reanálisis de los mismos. Por tanto, la incorporación de prácticas digitales "abiertas" a la gestión y estudio del patrimonio arqueológico y cultural histórico refuerza la creación de conocimiento y fomenta la creación de redes y la comunicación entre disciplinas e investigadores/as. En definitiva, el propósito de esta investigación no ha sido únicamente desarrollar un proyecto capaz de resolver una serie de objetivos y preguntas de investigación históricas —lo cual es fundamental—, sino inspirados por los principios anteriormente mencionados, se diseñó un proyecto también capaz de aplicar enfoques abiertos a la gestión, almacenamiento y publicación de sus datos y resultados de investigación.

2.4 DE LA TEORÍA A LA IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA

2.4.1 Diseño e implementación del proyecto

La arqueología del paisaje utiliza múltiples enfoques y técnicas de diversas disciplinas, pero debido a las muchas propuestas, no existe un único camino sobre cómo deben desplegarse (Buxó *et al.*, 1998; Layton & Ucko, 1999). En este sentido, los principios anteriormente expuestos abren la posibilidad a enfoques de investigación transdisciplinares. Sin embargo, es importante señalar que esto no debe interpretarse como un llamamiento a un diseño de investigación desorganizado; debe haber cierta coherencia interna para evitar narrativas basadas en correlaciones débiles disfrazadas de explicaciones causales (Contreras, 2017; Huggett, 2020). En este contexto, los distintos tipos de fuentes, la recopilación de datos de distinta naturaleza y el empleo de diversas técnicas han contribuido de manera significativa a diferentes aspectos o análisis específicos a lo largo de esta investigación, ofreciendo resultados que, de manera conjunta, han permitido obtener una comprensión más completa de los fenómenos estudiados.

Este estudio ejemplifica estos planteamientos al utilizar una amplia variedad de fuentes y tipos de datos —incluidos datos heredados (*legacy data*) y literatura gris (*grey literature*)— (véase Cap VI. La importancia de la "apertura" en la investigación arqueológica) para cotejar y obtener mayor información arqueológica, etnográfica y medioambiental sobre regiones que aún hoy en día son arqueológica e históricamente poco conocidas. De este modo, la integración de estudios de campo con datos publicados, informes arqueológicos, cartografía, archivos digitales y fotografías aéreas históricas, junto con imágenes satélite han resultado de gran valor. Estos recursos han sido especialmente útiles para identificar elementos arqueológicos dispersos,

que suelen considerarse indicadores indirectos para inferir patrones de asentamiento, movilidad y dinámicas sociales de las comunidades a través de los paisajes que estudiamos. Además, a partir de estos recursos se han podido reconstruir indicadores geográficos y ambientales, lo que permite un enfoque holístico adaptado al presente marco de investigación.

Igualmente, coincidimos con algunos proyectos que combinan enfoques tanto formalistas como constructivistas para comprender los paisajes (Knitter, Bebermeier *&* Nakoinz, 2021). Así, diversos métodos y técnicas de investigación de naturaleza computacional (p. ej., análisis mediante SIG) han sido necesarios para cumplir con losobjetivos; sin embargo, la comprensión de la agencia —i.e., la capacidad de realizar acciones y/o afectar a otros "agentes" o "factores", considerando que los humanos y no humanos se interrelacionan entre sí— ha sido igualmente fundamental. Para explorar esto, también se han implementado análisis cuantitativos que nos han ofrecido valiosas perspectivas sobre los patrones de asociación entre elementos humanos (p. ej., asentamientos, lugares productivos, estructuras de movilidad, etc.) y factores medioambientales (p. ej., topografía, clima, hidrología, etc.). Estas aproximaciones, a su vez, han permitido interpretar cómo los humanos habitaron, transitaron y moldearon sus paisajes, considerando además diferentes agentes en estas dinámicas.

Finalmente, cabe destacar que, desde la propia conceptualización del proyecto, el objetivo ha sido encontrar un equilibrio entre personalización y estandarización. Un proyecto personalizado, adaptado a las preguntas y objetivos de la investigación, era clave. Mientras que, la estandarización también era importante para alinearse con los principios de apertura, accesibilidad y reutilización de los datos anteriormente enunciados. En

relación con este último aspecto, se han tenido en cuenta ontologías existentes y lenguajes semánticos compartidos publicados, tanto desde la propia producción de los modelos de datos que nos permitieran procesar todo el flujo de información, como en el desarrollo y gestión de los conjuntos de datos generados en el marco de esta investigación. Esto permite, al mismo tiempo, resolver las cuestiones y objetivos planteados y ser interoperables con otras plataformas y portales arqueológicos que también trabajan con datos abiertos (p. ej., EAMENA: https://eamena.org/; Desert Networks: https://desertnetworks.huma-num.fr; VIATOR-e: https://viatore.icac.cat/; entre otros), además de adherirnos a algunas de las ideas propuestas por ADS (https://archaeologydataservice.ac.uk/) o tDAR (https://core.tdar.org/).

2.4.2 Cómo estas aproximaciones nos permiten estudiar la complejidad

Estas aproximaciones incluyen tecnologías, métodos y técnicas avanzadas de mapeo, análisis espacial, *machine learning* y ciencia de redes, que permiten una mejor caracterización de la complejidad espacial y temporal del registro arqueológico. Así, estas aproximaciones tienen el potencial de contribuir a comprender de forma más detallada las dinámicas sociales y sus interacciones con el mundo biofísico, explorando formas innovadoras de representar y analizar los datos arqueológicos y medioambientales. Este enfoque metodológico nos aleja de la práctica tradicional de reconstruir pasados complejos mediante la extrapolación inductiva a partir de registros arqueológicos fragmentarios. En cambio, propone un enfoque de investigación exploratorio donde la experimentación sistemática y la verificación de hipótesis se convierten en la piedra angular de la investigación (Barton, 2014). De esta forma, la naturaleza incompleta y alterada del registro

es "menos problemática", permitiendo reconstruir los sistemas dinámicos y complejos que componen las sociedades que habitaron los paisajes que analizamos.

Para aplicar estos planteamientos en el contexto del Mar de Libia —i.e., tanto en el Egeo (Creta) como en el noreste de África mediterránea (Marmárica)—, el enfoque metodológico incluye la reorganización y el análisis de diversos conjuntos de datos que sirven como indicadores de las complejas dinámicas socioecológicas a distintas escalas y a largo plazo (*longue durée*). Este análisis se extiende desde el Bronce Final hasta época romana y pone el foco sobre la identificación de patrones y tendencias que reflejen la dinámica a diversas escalas temporales y espaciales, con el fin de dilucidar tres aspectos clave de los procesos de interacción: las dinámicas de acoplamiento entre unidades sociales y el entorno, la evolución de las redes socioespaciales y la relación entre escala y complejidad.

La dificultad para llevar a cabo estos objetivos ha requerido la aplicación de diversos métodos y técnicas, entre las cuales se incluyen la prospección aérea remota a través del mapeo de sitios arqueológicos y el análisis SIG. Este enfoque ha proporcionado una comprensión exhaustiva de la ubicación precisa de antiguos emplazamientos, permitiendo su evaluación, registro y documentación, así como la identificación de relaciones espaciales, incluyendo indicadores geográficos y ambientales (Rayne *et al.,* 2017, 2020; Roberts *et al.,* 2021). Además, este estudio implementa análisis espacial para detectar la existencia de posibles patrones y explorar si la localización y distribución espacial de los sitios podrían estar relacionadas con factores específicos o determinadas variables, como la presencia de rutas de tránsito, zonas históricas de captación de recursos, orografía, red hidrológica, etc. —

i.e., diversos factores humanos y no humanos. Para ello, hemos aprovechado el potencial combinado de varios métodos cuantitativos diseñados para comprobar gráfica y estadísticamente el tipo de distribución de los sitios arqueológicos. Entre ellos se incluyen la estimación de la densidad de Kernel (KDE), la función K de Ripley, las pruebas de Hopkins-Skellam, análisis de percolación, análisis de coste-distancia, Kolmogorov-Smirnov y Z1 y Z2 de Berman, así como los análisis *Receiver Operating Characteristic* (ROC) y *Area Under the Curve* (AUC) (Baddeley, Rubak *&* Turner, 2015; Bevan, 2020; Maddison, 2020). De igual modo, hemos construido un modelo predictivo mediante el empleo de redes bayesianas (Moschovakis, 2001; Franzese, Hays *&* Kachi, 2012). Las redes bayesianas constituyen un enfoque dentro del aprendizaje automático supervisado (*machine learning*), mediante el cual se generan modelos gráficos predictivos utilizando inferencia probabilística (Koller *&* Friedman, 2009). Estos métodos y técnicas nos han ofrecido información valiosa para identificar agrupaciones, dispersión o patrones de asociación.

Para la reconstrucción y estudio de los patrones de movilidad y flujos de interacción históricos, hemos empleado tanto análisis espacial como métodos de ciencia de redes. En referencia al primero, destacan los análisis de superficie de coste acumulado (ACS), específicamente redes de movilidad focal, método conocido en inglés como *Focal Mobility Network* (FMN) (Llobera, Fábrega-Ávarez *&* Parcero-Oubiña, 2011; Dedérix, 2016), o también denominado inicialmente como Modelo de Acumulación de Desplazamiento Óptimo (MADO) (Fábrega-Álvarez, 2006). Adicionalmente, este proyecto ha integrado métodos de ciencia de redes para dilucidar cómo la conectividad multiescalar influye en la estructuración de las interacciones comunitarias a través de los paisajes a lo largo del tiempo. Estos enfoques ofrecen

herramientas y conceptos para explorar diversos procesos de interacción en funcionamiento dentro de entornos determinados (Brughmans & Peeples, 2018, 2020, 2023; Brughmans *et al.,* 2023; Brughmans & Laguna-Palma, 2023). De este modo, mediante la combinación de estas aproximaciones, hemos podido contribuir a arrojar luz sobre la organización y dinámica socioespacial de las antiguas comunidades que habitaron a lo largo del Mar de Libia, a la par que da cuenta de los distintos condicionamientos geográficos y ambientales.

Al estudiar las dinámicas socioecológicas en estas regiones, se revelan perspectivas valiosas sobre cómo la interacción dinámica entre las comunidades y su entorno permite comprender cómo estas sociedades han respondido a los cambios sociales, culturales y políticos, al tiempo que enfrentaban desafíos ambientales, gestión de recursos, etc., a lo largo de la historia. Además, estas lecciones pueden ser cruciales para abordar desafíos actuales, tales como el cambio climático, la degradación ambiental y/o la sobreexplotación de recursos naturales. Al extrapolar lecciones aprendidas de la gestión de recursos y la resiliencia ambiental en el pasado, la investigación puede ofrecer estrategias adaptativas para el presente y futuro. Esto ofrece posibles caminos hacia la sostenibilidad, al tiempo que destaca la importancia de una gestión ambiental informada y la necesidad de políticas que promuevan un equilibrio entre desarrollo y conservación patrimonial y medioambiental.

III

INTERPRETANDO LA TOPOGRAFÍA ARQUEOLÓGICA

III

INTERPRETANDO LA TOPOGRAFÍA ARQUEOLÓGICA

3.1 MAPEO & CARTOGRAFÍA ARQUEOLÓGICA

3.1.1 La prospección arqueológica

En este capítulo se aborda la fase de la investigación exploratoria, en la que se describen cada uno de los pasos seguidos para identificar, caracterizar y evaluar elementos arqueológicos a lo largo de las distintas topografías de las regiones estudiadas. Asimismo, se detallan los procedimientos empleados para definir las características antropogénicas —i.e., modificaciones en el paisaje realizadas por los humanos—, como la expansión urbana, construcción de carreteras, intensificación de la agricultura, etc.; y medioambientales —i.e., aspectos naturales del entorno— como las formas del terreno (topografía), las características del agua (hidrografía), variables climáticas, etc. Este esfuerzo coordinado por registrar y contextualizar elementos arqueológicos y su entorno nos sitúa dentro del ámbito de la prospección arqueológica, la cual puede definirse como el conjunto de métodos, técnicas y tecnologías orientadas al reconocimiento y documentación de la evidencia arqueológica tanto en superficie como debajo de ella (Gamble, 2001; García Sanjuán, 2004, 2005; Martín-Bueno & Sáenz-Preciado, 2017; Carrero-Pazos, 2023; entre otros). En este caso, el enfoque se centra exclusivamente en el reconocimiento de superficie, aunque no se pretende detallar exhaustivamente los principios y métodos que guían esta práctica en el campo de la investigación. Más bien, el objetivo es explorar las implicaciones metodológicas que fundamentan y articulan su empleo, con el

propósito de establecer vías para una mejor caracterización y contextualización del patrimonio arqueológico. Esto requiere de un marco que no solo permita estudiar la materialidad, sino también entender su relación con el entorno natural (geografía, clima, etc.) y cultural (actividades humanas, modificaciones del paisaje, etc.).

Históricamente, sin embargo, la documentación y registro de la evidencia arqueológica a nivel de superficie ha estado supeditada (casi) exclusivamente a la tarea de identificación de yacimientos significativos para su posterior excavación (Ruiz Zapatero, 1988; Ruiz Zapatero *&* Burillo Mozota, 1988; Fernández Martínez, 1989; Gamble, 2001; García Sanjuán, 2004; Carrero-Pazos, 2023); no siendo hasta la década de 1960, con el surgimiento de la arqueología procesual, también conocida como "Nueva Arqueología" (*New Archaeology*) (Binford, 1962; Clarke 1973) y, posteriormente, postprocesual (Hodder, 1982; Shanks *&* Tilley, 1987), que esta aproximación metodológica comenzó a reconocerse de manera independiente como un pilar fundamental de la investigación arqueológica (García Sanjuán, 2004). De este modo, ha pasado de ser inicialmente reconocida como una herramienta para la mera identificación y documentación de yacimientos, hasta convertirse en una aproximación clave para la comprensión del funcionamiento y pautas de comportamiento de las sociedades del pasado (Binford, 1964; Dunnell, 1971; Schiffer, 1976; Plog, Plog *&* Wait, 1978; Schiffer, Sullivan *&* Klinger, 1978; Dunnell *&* Dancey, 1983; Kowalewski, 1990, 2008; Hodder, 1999; Herrera Malatesta, 2018, entre otros). Tal como señala Lewis Binford, "cualquier investigación debe incluir una consideración sistemática de regiones que pudieron haber contenido sistemas culturales" (Binford, 1964: 426). Además, su despegue y consolidación se relaciona intrínsecamente con el desarrollo de nuevas metodologías dentro de la disciplina, ampliando y enriqueciendo

considerablemente su enfoque y aproximaciones pudiendo incluso realizarse a diversas escalas y niveles de intensidad (García Sanjuán, 2004, 2005; Herrera Malatesta, 2018).

Estos dos últimos términos se relacionan con el alcance geográfico de la investigación (escala) y el método con el que se examina la superficie del terreno (intensidad) y se dividen principalmente en dos: la prospección extensiva e intensiva (Gamble, 2001; Plog, Plog *&* Wait, 1978; Tartaron, 2003). La primera comprende el estudio de grandes áreas o paisajes con el objetivo de identificar la presencia de elementos arqueológicos y comprender su distribución espacial dentro de un marco geográfico amplio. La segunda, en cambio, se centra en áreas de menor tamaño y bien delimitadas, buscando obtener una comprensión más detallada de contextos arqueológicos específicos (Cherry *et al.*, 1988; Cherry, 2003; Tartaron, 2003; De Haas, 2012; Bevan *&* Conolly, 2013; D'Agostino *&* Orsi, 2015). La elección entre prospección extensiva o intensiva dependerá de los objetivos, los recursos disponibles y el tipo de análisis. No obstante, ambas aproximaciones son complementarias y, a menudo, se integran durante la investigación, estableciendo un marco de estudio secuencial y a diversas escalas de análisis.

Cabe destacar, además, que existen una serie de condicionantes que escapan al control de los arqueólogos/as, los cuales influyen o dificultan el desarrollo de dicha práctica arqueológica. Uno de los más significativos está relacionado con la accesibilidad, ya que la dificultad para acceder a determinadas áreas —por ejemplo— debido a la orografía del terreno o regiones con una gran inestabilidad política, puede obstaculizar de manera significativa o incluso llegar a imposibilitar su exploración. También, como un factor clave, está la visibilidad o la obstrusividad, ambas relacionadas con elementos externos

como la cobertura vegetal o la erosión del terreno, que afectan la capacidad para identificar elementos o estructuras arqueológicas en la superficie (Schiffer, Sullivan & Klinger, 1978; Wheatley & Gillings, 2000, 2002; Hester, Shafer & Feder, 2009). Finalmente, otros aspectos como la densidad y agregación que presentan los restos arqueológicos a lo largo de la topografía describen distribuciones espaciales complejas, mostrando diversas pautas de agrupación, dispersión o patrones de asociación. Estos condicionantes requieren que los arqueólogos/as sean flexibles y adaptables en sus estrategias de investigación, estableciendo métodos y técnicas de análisis adecuados a los objetivos y preguntas de investigación, pero también a los diferentes condicionamientos físicos, disponibilidad recursos y fuentes de información.

3.1.2 Estrategias adaptadas a la "revolución" tecnológica

La arqueología ha entrado en una nueva era a raíz de lo "digital". Ahora más que nunca, hay un número creciente de estudios que hacen hincapié en las tecnologías digitales y enfoques computacionales (Huggett, 2014, 2015, 2017; Grosman, 2016; Forte, 2016; Ferdani *et al.*, 2019; Tanasi, 2020; Turchin *et al.*, 2020; Opitz *et al.*, 2021; entre otros). En este contexto, los datos están cambiando rápidamente su formato: de analógico a digital. También están surgiendo nuevos enfoques y estrategias para almacenarlos y gestionarlos, unidos a la importancia de vincular datos dispares de distintas disciplinas tradicionales (Strollo, D'Auria & De Silla, 2017; Garagnani & Gaucci, 2020; Nicholson *et al.*, 2023). Esta cuestión es aún más acuciante en propuestas y enfoques preocupados por las relaciones humano-ambientales (p. ej., la arqueología del paisaje), donde superar las limitaciones de escala —i.e., la necesidad de cartografiar extensas áreas o paisajes— y formato —i.e., la integración y análisis de grandes conjuntos de datos de distinta naturaleza—

son esenciales. Por su propia naturaleza, las Tecnologías de Información Geográfica (TIG, en adelante) son particularmente representativas de estos avances (Quirós Hernández *&* Cabero Diéguez, 2011). Utilizamos el término TIG por considerarlo más amplio e inclusivo a la hora de describir los distintos recursos, técnicas y aplicaciones que abarcan las tecnologías geoespaciales — i.e., Teledetección, Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), Sistemas de Información Geográfica (SIG), LiDAR, etc.— (Mayoral Herrera *&* Sevillano Perea, 2016: 81). Esta serie de tecnologías permiten la adquisición, correlación y análisis de múltiples capas de datos e información, lo que facilita abarcar la extensa variedad del registro material de las sociedades del pasado junto a las distintas variables geográficas y ambientales.

Volviendo al ámbito de la prospección arqueológica, la diversidad de casos y la compleja distribución espacial que presentan los elementos arqueológicos, junto con las limitaciones anteriormente mencionadas de accesibilidad, visibilidad, etc. hace que sea necesario la adopción de distintos enfoques y aproximaciones. Esto implica un largo y complejo proceso que va desde la planificación preliminar, seguido de la recopilación y estudio de diversos datos, hasta el análisis y presentación de los resultados de la investigación (Gamble, 2001). Dentro de este flujo de trabajo secuencial y en el ámbito de las TIG, destacan los Sistemas de Información Geográfica (SIG, en adelante), que han transformado la metodología de investigación, optimizando todo proceso de recopilación, gestión, visualización y análisis de datos e información. Incluso, proporcionan una serie de herramientas que permiten una mayor precisión y mejora de la capacidad analítica de la investigación (Figura 3.1) (Allen, Green *&* Zubrow, 1990; Lock *&* Stančič, 1995; Aldenderfer *&* Maschner, 1996; Baena Preysler, Blasco Bosqued *&* Quesada Sanz, 1997; Wescott *&* Brandon, 1999; García Sanjuán, 2005; Chapman, 2006; Grau Mira, 2006;

Mehrer & Wescott, 2006; Parcero Oubiña & González Pérez, 2007; Conolly & Lake, 2009; Wheatley & Gillings, 2002; Bevan & Lake, 2013; Polla & Verhagen, 2014; Nakoinz & Knitter, 2016; Gillings, Hacigüzeller & Lock, 2020; Carrero Pazos, 2023; entre otros).



Figura 3.1. Principales aplicaciones de los SIG (modificado a partir de Connolly & Lake, 2009: 30).

Por tanto, si atendemos a sus capacidades fundamentales, los SIG pueden definirse como sistemas diseñados para capturar, almacenar, manipular, analizar, gestionar y representar todo tipo de datos georreferenciados (Olaya, 2016). Esto último es de suma importancia en arqueología, ya que los SIG

permiten trabajar con datos arqueológicos en combinación con información geográfica y ambiental asociada a una referencia espacial (Conolly & Lake, 2009; Menéndez-Marsh *et al.*, 2023). En esencia, se puede afirmar que estos sistemas actúan como un elemento integrador de datos, información y tecnologías. Esta capacidad integradora es clave, ya que permite combinar datos provenientes de diversas fuentes, como registros históricos, prospecciones de campo, sensores remotos, etc., canalizando toda esta información dentro de un único sistema (Olaya, 2016). Dicha capacidad habilita a los arqueólogos/as a gestionar y analizar grandes conjuntos de datos en un entorno unificado, permitiendo la identificación de patrones y relaciones que serían muy difíciles de discernir a través de métodos más tradicionales (Wheatley & Gillings, 2002; Conolly & Lake, 2009; Gillings, Hacigüzeller & Lock, 2020).

No obstante, al igual que otras aproximaciones metodológicas, los SIG no son exclusivos ni surgieron dentro del ámbito de la disciplina arqueológica. Para conocer su origen y evolución es necesario remontarse a la segunda mitad del siglo XX, periodo en el que se produjo de forma paralela y gradual un fuerte desarrollo en ámbitos como la cartografía y la informática. Específicamente, en 1959, Waldo Tobler definió los principios de un sistema denominado MIMO (*map in-map out*) con el objetivo de aplicar sistemas informatizados al campo de la cartografía, estableciendo los principios básicos para la creación de datos geográficos, su codificación, análisis y representación (Olaya, 2016: 26). Sin embargo, no sería hasta 1963 cuando Roger Tomlinson desarrolló el *Canada Geographic Information System* (CGIS), el primer sistema precursor de lo que hoy día formalmente reconocemos como un SIG (Tomlinson, 1967). Otros hitos importantes incluyen experiencias como la llevada a cabo por el *Harvard Laboratory* (EE. UU.) y el *Experimental Cartography Unit* (Reino Unido),

con la introducción del *Synagraphic Mapping Technique* (SYMAP), seguido por desarrollos como el sistema GRID de la mano de David Sinton y posteriormente del *Interactive Manipulation GRID* (IMGRID). Estas innovaciones continuaron su desarrollo durante las décadas posteriores, impulsadas tanto por el ámbito académico como el sector privado, destacando el surgimiento de grandes compañías comerciales como ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) (Olaya, 2016: 27; Díaz Rodríguez, 2019: 55; Carrero Pazos, 2023: 23).

Paralelamente al desarrollo tecnológico, hay que sumar la irrupción e influjo de los principios de la "Ciencia Abierta" (*Open Science*), que han fomentado y popularizado el desarrollo de aplicaciones de software libre. Esto ha tenido su impacto también en el ámbito de las tecnologías geoespaciales, democratizando su acceso y uso (p. ej., QGIS, GRASS GIS, SAGA, etc.). Dentro de este panorama en constante cambio, la generalización del uso de internet, junto a la aparición de aplicaciones como *Google Earth*, ha permitido que estos enfoques trasciendan su influencia más allá de los círculos profesionales y académicos, alcanzando a la sociedad en general y transformando radicalmente cómo comprendemos y gestionamos el espacio geográfico (Díaz Rodríguez, 2019; Carrero-Pazos, 2023).

Por tanto, aunque estos enfoques y aproximaciones no están exentos de críticas (véase Cap. II, *Redes*), estas aplicaciones se han consolidado como un recurso inigualable durante los procesos de adquisición, gestión y análisis de datos e información. Esto ha resultado en una integración sin precedentes de fuentes y datos desde diversos ámbitos, que en la actualidad se emplean de forma conjunta para solucionar cuestiones complejas específicas, especialmente relacionadas con el urbanismo, la ingeniería, la biología, la

geología, la gestión de recursos naturales y el patrimonio arqueológico. No obstante, es fundamental que los investigadores/as que integran estas aproximaciones deben asegurarse siempre de que su empleo esté fundamentado en un entendimiento sólido de las capacidades y limitaciones de estas aplicaciones (Connolly & Lake, 2009: 27).

3.1.3 Teledetección y registro del patrimonio

Como se ha señalado anteriormente, los SIG poseen además el potencial para integrar diversas tecnologías. Un ejemplo representativo es el uso específico de datos obtenidos a través de la observación de la Tierra, como fotografías aéreas e imágenes satélite capturadas mediante sensores remotos. Este tipo de aplicaciones se enmarcan dentro del ámbito de la teledetección, la cual puede definirse como el conjunto de técnicas y procedimientos destinados a identificar y caracterizar elementos de la superficie terrestre sin estar directamente en contacto con ella (Chuvieco, 1990; Montufo Martín, 1991; Olaya, 2016; Palacios-Jurado, Martín-Bueno & Uribe Agudo, 2017; entre otros). El reconocimiento aéreo, además de posibilitar la localización y caracterización de estos elementos, también permite la monitorización de los cambios que se producen en ellos y el entorno a lo largo del tiempo. Aplicado al ámbito de la investigación arqueológica, estas aproximaciones facilitan la exploración remota de áreas arqueológicas sin alterar el terreno, superando diversas barreras o limitaciones (p. ej., accesibilidad) (Parcak, 2009; Giardino, 2011; El-Behaedi & Ghoneim, 2018; Herdon *et al.*, 2023; Verhoeven & Sevara, 2016). Esto permite cubrir extensas áreas que serían inaccesibles o inabarcables mediante métodos más convencionales, rastreando además los cambios diacrónicos sobre estos elementos y su entorno, ofreciendo una lectura de los paisajes arqueológicos a través de diversas escalas espaciales y

temporales (Campana & Forte, 2011; Chapman, 2006; Comer & Harrower, 2013; Rayne *et al.*, 2017, 2020; Rayne & Donoghue, 2018; Tapete, 2019).

Dentro del ámbito de la teledetección, también es esencial distinguir si el sensor encargado de capturar la información se encuentra a bordo de una avioneta, avión no tripulado o dron, o si, en cambio, se localiza en un satélite. En los primeros casos, se habla de teledetección aérea y nos ofrece una mayor flexibilidad para ajustar los parámetros de captura de datos según las necesidades específicas del estudio (Bennet, Cowley & De Laet, 2014; Campana, 2017; Palacios-Jurado, Martín-Bueno & Uribe Agudo, 2017). Esto se debe a que las aeronaves o drones pueden volar a altitudes variables y seguir rutas personalizadas, permitiendo la obtención de datos de alta precisión y resolución espacial, lo que resulta especialmente útil para estudios a pequeña escala. Por otra parte, en el segundo de los casos, hablamos de teledetección espacial o satelital y se caracteriza principalmente por su capacidad para ofrecer una cobertura global y continua de la superficie terrestre (Chuvieco, 1990; Montufo Martín, 1991; Comer & Harrower, 2013; Campana & Forte, 2016; Palacios-Jurado, Martín-Bueno & Uribe Agudo, 2017). Esto implica que distintos satélites en órbita alrededor de la Tierra pueden capturar datos de vastas áreas o paisajes, lo cual es fundamental para el monitoreo a diversas escalas (multiescalar) y a largo plazo (temporalidad). Además, es importante distinguir entre los tipos de sensores utilizados en la generación de imágenes para ambos casos, dividiéndose en dos categorías: pasivos y activos (Chuvieco, 1990; Montufo Martín, 1991; Olaya, 2016). Los sensores pasivos (p. ej., cámaras fotográficas, radiómetros, etc.), no emiten ningún tipo de radiación, solo capturan la información procedente de la radiación solar que refleja la Tierra o emiten los propios elementos. Por el contrario, los sensores

activos (p. ej., radar, LiDAR, etc.), emiten radiación que se refleja en los elementos y miden la energía que se devuelve reflejada al sensor —i.e., proceso de escaneo de la superficie (Rejas Ayuga & Burillo Mozota, 2016; Olaya, 2016; Adamopoulos & Rinaudo, 2020).

Todos estos parámetros deben ser considerados teniendo en cuenta factores como la escala, precisión y temporalidad de los datos requeridos al abordar la investigación. No obstante, a pesar de que las técnicas de teledetección ofrecen imágenes desde diferentes sensores y plataformas de observación (p. ej., aviones o satélites), y aunque en este estudio se han considerado ambas, aquí se destacan principalmente las proporcionadas por los satélites. La razón principal es que estos ofrecen datos multiescalares sobre vastas áreas, teniendo la ventaja, además, de que pueden permanecer mucho tiempo en una órbita específica, lo que permite una observación continua y temporal de los paisajes (Palacios-Jurado, Martín-Bueno & Uribe Agudo, 2017). Otro aspecto esencial a considerar es la tipología de los satélites en base a la órbita que describen, y que también se dividen en dos categorías principales: geoestacionarias y heliosíncronas. En la primera, el satélite se encuentra sobre el ecuador y se mueve a la misma velocidad angular que la rotación de la Tierra. Esto le permite permanecer en una posición fija relativa a la superficie terrestre, proporcionando la observación continua de una misma área y posibilitando el registro de imágenes a intervalos breves de tiempo. Sin embargo, estos satélites se sitúan a una gran distancia de la Tierra, por lo que la resolución espacial de las imágenes que se pueden obtener es menor, lo cual puede ser un inconveniente para estudios que requieren de alta resolución. En contraste, los satélites que orbitan de forma heliosíncrona (también denominados como polares o cuasi polares) lo hacen a altitudes menores, pasando cerca de los polos norte y sur en cada giro sobre el eje terrestre. Estos

satélites describen una órbita casi perpendicular al ecuador y, debido a la rotación de la Tierra, pueden capturar datos de prácticamente toda la superficie terrestre con una mayor resolución espacial (Chuvieco, 1990; Montufo Martín, 1991; Olaya, 2016).

Volviendo al ámbito de la investigación arqueológica, la evolución de la tecnología ha jugado un papel fundamental desde los primeros esfuerzos por captar imágenes para el reconocimiento aéreo. Un hito significativo se alcanzó en 1906 cuando el *Royal Engineers' Balloon Section* logró tomar las primeras fotografías aéreas de Stonehenge. Posteriormente, la Primera Guerra Mundial impulsó este tipo de prácticas al descubrirse que las fotografías aéreas tomadas desde aeroplanos y globos podían ofrecer una perspectiva general y detallada de los monumentos históricos (Lindsay *&* Mkrtchyan, 2023: 165). Un referente de este periodo fue Osbert G. S. Crawford, fundador de la revista *Antiquity*, quien en 1920 fue contratado por la *Ordnance Survey* para integrar información arqueológica en los mapas del ejército. Crawford fue uno de los primeros en reconocer el potencial de las fotografías aéreas para el análisis sistemático del paisaje arqueológico. La eficacia de estas aproximaciones quedó ampliamente demostrada en 1925, cuando se evidenció que mediante estas técnicas se podían localizar no solo sitios arqueológicos en la superficie, sino también sumergidos, revelando por primera vez el antiguo puerto de Tiro (Líbano) (Palacios-Jurado, Martín-Bueno *&* Uribe Agudo, 2017: 128). Otros pioneros en la arqueología aérea fueron Antonine Poiderbard, quien sobrevoló los desiertos de Siria, Iraq y Jordania, o la piloto y fotógrafa Mary Bailey, quien superó las barreras metodológicas (y de género) al combinar la identificación y el registro aéreo de sitios arqueológicos con inspecciones detalladas sobre el terreno en el oasis egipcio de Kharga (Lindsay *&* Mkrtchyan, 2023: 165). En los años posteriores, especialmente durante la

Segunda Guerra Mundial, la planificación y ejecución de numerosos vuelos de reconocimiento y toma de fotografías aéreas marcaron los primeros esfuerzos por cartografiar la topografía de territorios a gran escala y a nivel global. Este desarrollo continuó durante el contexto de la Guerra Fría, sumado a la aparición de los vuelos espaciales orbitales, que produjeron avances significativos en las técnicas de reconocimiento (Lindsay *&* Mkrtchyan, 2023). Algunos ejemplos destacados fueron los desarrollados por el *United States Reconnaissance Office*, que, desde la década de 1960, impulsó la creación y puesta en órbita con fines de inteligencia de una serie de satélites espía, como los programas CORONA, HEXAGON y GAMBIT (Ur, 2003, 2006, 2013; Casana *&* Cothren, 2013; Casana, 2020; Hammer, FitzPatrick *&* Ur, 2022). Estos programas generaron durante décadas archivos masivos de imágenes que cubrían gran parte del globo y comprendían las primeras capturas estereoscópicas —i.e., técnica que proporciona una percepción de profundidad (efecto 3D) a partir de dos imágenes planas— de alta resolución (hasta ~2 m) de la superficie terrestre (Hammer, FitzPatrick *&* Ur, 2022).

En la actualidad, sin embargo, uno de los principales desafíos a la hora de aplicar estos enfoques es el coste asociado al uso de datos geoespaciales avanzados, lo cual está fuera del alcance de los recursos de muchos proyectos de investigación (Petrosyan *et al.*, 2021). No obstante, existe también una amplia variedad de fuentes "abiertas" que facilitan la obtención o visualización de este tipo de datos e información de forma gratuita o a bajo coste, y que tienen la calidad y resolución suficientes para muchas aplicaciones arqueológicas, además, sin la necesidad de una inversión significativa en software especializado. Ejemplos de estas fuentes incluyen los programas *Landsat*, *Sentinel-2*, *Planetscope*, *Ikonos*, *Quickbird*, *Worldview*, *Pléiades*, así como las plataformas virtuales de *Google Earth* (Google),

WorldWind (NASA), *Bing Maps* (Microsoft) o *ArcGIS Online* (ESRI), que son quizás las puertas de entrada más frecuentes a la teledetección arqueológica. Otras fuentes proporcionan otro tipo de datos más versátiles acerca de la topografía o características de la cobertura terrestre, como los Modelos Digitales del Terreno (MDT) o los Modelos Digitales de Elevación (conocidos como DEM, por sus siglas en inglés), disponibles a través de programas como la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) y/o el portal del *Copernicus Land Monitoring Service* (CLMS) de la Unión Europea (Buchhorn *et al.,* 2020).

Esta disponibilidad ha provocado la democratización del uso de estos recursos, aunque, como destacan Opitz y Herrmann (2018: 13), "la fácil accesibilidad a determinados conjuntos de datos de teledetección puede llevar a subestimar fácilmente la formación y la práctica crítica necesarias para procesarlos e interpretarlos de forma correcta". A pesar de estas cuestiones, el verdadero potencial que ofrecen estas aproximaciones radica en la capacidad de obtener y analizar conjuntos de datos multiescalares y temporales sobre las mismas áreas o paisajes a lo largo del tiempo. Esto permite tres aplicaciones esenciales: (i) identificación de sitios arqueológicos distribuidos en grandes áreas geográficas, (ii) caracterización y documentación de la variación histórica de los paisajes, y (iii) seguimiento remoto de las condiciones de los sitios, evaluando los impactos y amenazas sobre el paisaje arqueológico. En definitiva, la identificación de sitios arqueológicos distribuidos a través de grandes áreas permite un enfoque multiescalar. La caracterización de las condiciones geográficas y ambientales y su variación histórica proporciona información crítica sobre la temporalidad de los paisajes. Y, por último, la monitorización permite la evaluación de los impactos sobre el patrimonio arqueológico debido a diversos factores humanos y no humanos.

3.2 APLICACIONES TÉCNICAS & MODELIZACIÓN DIGITAL

3.2.1 Fuentes, Recursos y Datos

La investigación exploratoria que aquí se expone, por su naturaleza, ha requerido de una gran cantidad de datos e información. A ello hay que sumar que no existía previamente ningún conjunto de datos compilado y publicado, especialmente para áreas arqueológica e históricamente poco representadas, que permitiesen explorar la relación entre la evidencia arqueológica y las distintas variables geográficas y ambientales. Por lo tanto, el estudio de las dinámicas socioecológicas a distintas escalas y a largo plazo en estas regiones ha dependido en gran medida de la recopilación sistemática, el análisis exhaustivo y la integración de una amplia variedad de fuentes, recursos y datos. Estos incluyen registros documentales, etnográficos y arqueológicos, repositorios digitales, archivos de la Segunda Guerra Mundial, cartografía, fotografías aéreas históricas e imágenes satélite (Laguna-Palma, Toscano & Rodríguez-Rellán, 2023, 2024). Así pues, los datos recopilados han proporcionado información detallada sobre diversos aspectos socioeconómicos (dinámicas de poblamiento, estrategias de subsistencia, etc.), geográficos (topografía, hidrografía, etc.), ambientales (temperatura, precipitación, etc.) y del desarrollo regional (expansión urbana, intensificación de la agricultura, etc.) de las regiones estudiadas. Además, la integración de diversos recursos históricos, como mapas topográficos, fotografías aéreas e imágenes satélite, junto con información arqueológica publicada de estas regiones ha permitido identificar y registrar la ubicación precisa de antiguos asentamientos, lugares de enterramiento, zonas productivas e históricas de captación de recursos y estructuras de movilidad. Esto ha sido posible debido a que los datos combinan información anterior a los desarrollos agrícolas, urbanos e industriales a gran escala ocurridos en

estas regiones especialmente desde la segunda mitad del siglo XX en adelante. En consecuencia, proporcionan un valioso registro de paisajes que ya no existen o que han sufrido cambios significativos a lo largo del tiempo.

Para entender mejor este proceso de recopilación de datos desde diversas fuentes de información, resulta útil analizar tanto las fuentes y recursos empleados como la forma en que estos se han integrado. Durante las primeras etapas del desarrollo de la investigación, se examinaron de forma exhaustiva registros documentales históricos, incluyendo textos clásicos como las *Historias* de Heródoto, la *Geografía* de Estrabón, en particular sus libros 8 al 10 (para Grecia) y el libro 17 (para Egipto y Libia), el *Itinerario Antonino*, o la *Tabula Peutingeriana* (Strassler, 2007; Estrabón, 2016a, 2016b (Gredos); Knight, 1998; Cunt, 2009; Rathmann, 2017), los cuales proporcionaron una base de descripciones geográficas sobre la ubicación de sitios y rutas históricas a lo largo de estas regiones. Adicionalmente, se empleó información de carácter etnográfico mediante el análisis de documentación histórica moderna, que incluía descripciones de viajeros del siglo XIX y principios del XX. Estos aportaban valiosas observaciones sobre lugares, rutas y comunidades, documentando tradiciones y prácticas culturales de las poblaciones locales, elementos cruciales para comprender los aspectos sociales y del desarrollo cultural en estas regiones (Browne, 1799; Hornemann, 1802; Hassanein Bey, 1924; Ball, 1927; Bagnold, 1935; Pendlebury, 1939; Hibbert, 1982; Grundon, 2007; Goudie, 2008; Pashley, 2012a, 2012b; entre otros).

Igualmente, se incorporó toda información o registro arqueológico publicado desde diversos proyectos de investigación que han realizado trabajo de campo a lo largo de estas áreas. Estos proyectos proporcionan información precisa a través de la publicación de datos de prospección, informes técnicos

de excavación o artículos de investigación (Hulin, 1999, 2001, 2008; Hulin, Timby & Mutri, 2009; Hulin *et al.*, 2010; Vetter, Rieger & Nicolay, 2009; Vetter, Rieger & Möller, 2013; Rieger, 2019, 2023; Watrous *et al.*, 2004, 2012; Driessen, 2022; entre otros). De forma complementaria, también se consideró información proporcionada por otros proyectos en los que su investigación es eminentemente digital y que compilan información arqueológica e histórica sobre estas regiones, y a los que dan acceso a través de sus plataformas web (p. ej., *Pleiades* (https://pleiades.stoa.org/), *Trismegistos* (https://www.trismegistos.org/index.php), *Topostext* (https://topostext.org/), VICI (https://vici.org/); entre otros).

Sin embargo, el estado actual de los datos e información disponibles para determinadas áreas, junto con el enfoque de investigación adoptado, impulsó rápidamente el uso de una mayor diversidad de fuentes y datos, incluidos datos heredados (*legacy data*) y literatura gris (*grey literature*). Algunos ejemplos representativos incluyen la cartografía histórica utilizada. En particular, destaca la serie de mapas topográficos producidos por la *Division Headquarters Army Air Forces* (*U.S. Army Map Service*), que cubren la totalidad de la zona de estudio y datan del contexto de la Segunda Guerra Mundial hasta la Guerra Fría (Figura 3.2). Esta división coordinó la producción de hasta 6.000 gráficos clasificados en seis series, cada una con una escala y propósito específicos: (1) Planificación mundial, escala 1:5.000.000; (2) Cartas meteorológicas mundiales, 1:5.000.000; (3) Navegación mundial de largo alcance, 1:3.000.000; (4) Cartas mundiales de pilotaje aeronáutico, 1:1.000.000 y 1:500.000; (5) Cartas de aproximación a áreas estratégicas, 1:250.000; y (6) Gráficos de objetivos de gran escala. Específicamente, para la región del Egeo (Creta), destaca la serie M506 (1948), a escala 1:250.000, mientras que para los territorios que abarcan el noreste del África mediterránea (Marmárica) lo hace

la serie P502 (1954), a escala 1:250.000. Esta última incorpora información de los mapas del Mando Británico de Oriente Medio elaborados entre 1941 y 1942, a partir de la información recopilada en 1916 por el *Survey of Egypt* para sus partes nororientales (Vetter, Rieger & Möller, 2013). Esta serie de mapas topográficos históricos representa uno de los primeros esfuerzos cartográficos a gran escala y su validez ha sido ampliamente contrastada en campo por diversos proyectos arqueológicos (Vetter, Rieger & Möller, 2013; Rieger, 2019, 2023; Ray & Nikolaus, 2022; entre otros). Esto se debe a que no solo contienen características topográficas de la superficie del terreno, sino que también proporcionan información precisa sobre la ubicación de asentamientos, lugares de enterramiento, áreas de producción, zonas de captación de recursos y estructuras de movilidad.

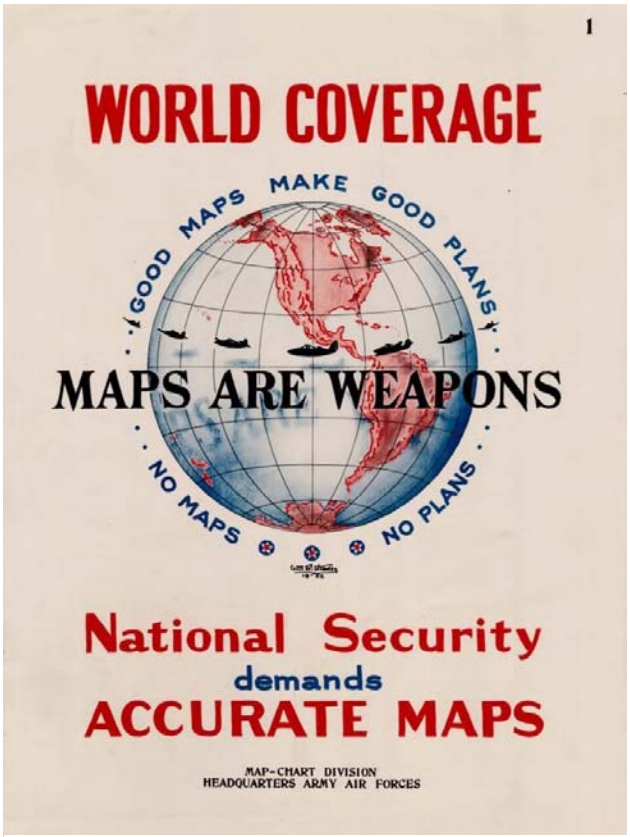


Figura 3.2. Cartel promocional del Cuartel General de la División aérea del ejército de EE. UU., 1942. (© *The University of Texas at Austin).*

De manera similar, destacan conjuntos de fotografías aéreas tomadas durante los mismos periodos. En particular, los vuelos de reconocimiento aéreo que la *Royal Air Force* (RAF) británica llevó a cabo sobre zonas del noreste de África desde el 23 de septiembre hasta el 1 de noviembre de 1938. Estos vuelos se realizaron utilizando biplanos *Hawker Hind* equipados con cámaras, con el objetivo de cartografiar mediante fotografías estereoscópicas esta región estratégica en el contexto prebélico de la Segunda Guerra Mundial (Figura 3.3) (Ray & Nikolaus, 2022). Para el contexto del Egeo, también hemos utilizado el fondo de fotografías aéreas históricas proporcionado por el gobierno griego a través del *Ελληνικό Κτηματολόγιο* (https://gis.ktimanet.gr/), que ofrece ortofotos aéreas para los periodos de 1945-1960, 2007-2009, 2010-2011 y 2015-2016, cubriendo la totalidad de Creta.



Figura 3.3. Ejemplos de diferentes capas de datos e información recopilados que cubren el área de Marsa Matruh (NO-Egipto). (A) La imagen satélite proporciona una visión contemporánea de la zona, destacando alteraciones recientes en el litoral y la expansión urbana; (B) Fotografía aérea de 1938 de la misma zona, tomada por la *Royal Air Force* (RAF) (© UCL *Institute of Archaeology*); (C) Mapa topográfico de 1955, *US Army Map Service* (P502, NH 35-3 Matruh © *The University of Texas at Austin*); (D) Distribución espacial de los sitios documentados (Mapa base: © *ESRI*).

Además, gracias a la colaboración específica con el proyecto de investigación germano-griego *German Occupation Database* (https://n9.cl/k69hj) dirigido por el investigador Valentin Schneider, se ha podido acceder a registros específicos generados durante la ocupación alemana de la isla de Creta entre 1941 y 1944 (en algunas partes de Creta occidental, hasta 1945). Debido al carácter ideológico de la ocupación alemana de Grecia durante la Segunda Guerra Mundial, la arqueología constituyó un componente esencial de la política durante el periodo de ocupación. En este contexto, se emitieron órdenes específicas para situar a las fuerzas en torno a los principales sitios arqueológicos, distribuyendo entre los soldados alemanes una serie de folletos con información arqueológica detallada (Figura 3.4) (Schneider, 2024).


23

Merkblätter

für den deutschen Soldaten

an den geschichtlichen Stätten Griechenlands

11/12. Kreta.

KRETA

1 KNOSSOS
2 PHAISTOS
3 HAG. TRIADA
4 MALLIA
5 TYLISSOS
6 GORTYN

Das Reich des Minos.

Wie Mykenae in der Sagenwelt Homers die Heimat Agamemnons ist, so ist König Minos nach der Sage ein gewaltiger Seekönig auf Kreta gewesen. Seine Flotte beherrschte das Ägäische Meer, seine Mannen beherrschten die Inselwelt der Kykladen. Athen beugte sich seiner Macht und schickte alle neun Jahre 7 Jünglinge und 7 Mädchen als Geisela, aus deren Reihen einst Theseus die Stunde der Befreiung Athens vom kretischen Joch heraufführen sollte. Auf Sizilien ist, wie es heisst, König Minos gefallen. Sein Reich ging zugrunde, aber sein Name blieb lebendig. Wie er seinem Volke ein weiser Gesetzgeber war, sollte er nach den Erzählungen nun als Totenrichter im Reiche der Schatten weiterleben.

Reich und Zeit des Minos müssen reich an Geschehnissen gewesen sein, lauscht man auf das, was noch viele Jahrhunderte später berichtet wurde. Der Künstler Dädalus lebte unter

Figura 3.4. Portada folleto informativo producido por el régimen nazi que contiene información arqueológica de Creta (© *Bundesarchiv*).

Para analizar la evolución de estas regiones en periodos posteriores a la primera mitad del siglo XX, se ha aprovechado el potencial combinado de los recursos y fuentes anteriormente mencionados, junto con imágenes satelitales de distintas series temporales. En particular, destacan el conjunto de imágenes analógicas desclasificadas del satélite espía *KH-9 Hexagon*, disponibles a través del *U.S. Geological Survey* (USGS). Esta serie de capturas ofrecen una cobertura de alta resolución, cruciales para documentar cambios en la estructuración del paisaje a partir de la década de 1970. Para las décadas posteriores, estos datos también se han combinado con imágenes satélite más recientes, como las proporcionadas por *Landsat* y *Sentinel-2*, así como las disponibles en las plataformas digitales de *Google*, *Microsoft* y *ESRI*. Además, se han integrado otros conjuntos de datos, tales como las capas globales de clasificación de la cubierta terrestre del proyecto *CORINE* (CLC) y *Sentinel-2*, así como modelos digitales de elevación (EU-DEM, SRTM 1) y datos climáticos proporcionados por los portales GAEZ (*Global Agro-Ecological Zones*) y *WorldClim* (Agapiou *et al.*, 2014; Buchhorn *et al.*, 2020; Kontgis, 2021) (Tabla 3.1). Estos datos e información se obtienen normalmente a través de plataformas de descarga, visualización en línea o servicios de mapas web (WMS), a los que se puede acceder directamente a través del servidor de una plataforma SIG. De este modo, ha sido posible establecer relaciones y conexiones entre diferentes conjuntos de datos de diversa naturaleza que abarcan distintas escalas espaciales (multiescalares) y temporales (análisis diacrónico). Esta correlación ha facilitado la identificación de patrones y tendencias a lo largo del tiempo en los paisajes arqueológicos de las regiones estudiadas.

Tabla 3.1. Fuentes de datos e imágenes utilizadas en el contexto de este estudio.

Datos/Fuente	Periodo	Max. Resolución (m)	Multiespectral (>4 Bandas)	Rectificada	Coste	URL
Imágenes Satélite Históricas						
HEXAGON KH-9 (Declass-2)	1973-1980	~10	No	No	Libre (30$/si necesita escaneo)	https://earthexplorer.usgs.gov/
HEXAGON KH-9 (Declass-3)	1971-1984	~1.5	No	No	Libre (30$/si necesita escaneo)	https://earthexplorer.usgs.gov/
Imágenes Satélite Multiespectrales						
Landsat	1972-	30 (15 pancromática)	Sí (8 bandas)	Sí	Libre	https://livingatlas.arcgis.com/landsatexplorer/
Sentinel-2	2015-	10	Sí (13 bandas)	Sí	Libre	https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/; https://gis.crete.gov.gr/
Imágenes de plataformas o servicios (WMS)						
ESRI Imagery	2000-	10-30	Sí (varias bandas)	Sí	Libre	https://www.arcgis.com/home/
Google Earth	2001-	15-30	Sí (varias bandas)	Sí	Libre	https://earth.google.com/
Bing Maps	2005-	15-30	Sí (varias bandas)	Sí	Libre	https://www.bing.com/maps/

Datos/Fuente	Periodo	Max. Resolución (m)	Multiespectral (≥4 Bandas)	Rectificada	Coste	URL
Modelos Digitales de Elevación (DEM)						
EU-DEM	2000-2011	25	n/a	Sí	Libre	https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/d08852bc-7b5f-4835-a776-08362e2fbf4b
SRTM 1	2014-	30	n/a	Sí	Libre	https://opentopography.org/; https://dwtkns.com/srtm30m/
Cobertura del suelo						
CORINE	2015-2021	100	n/a	Sí	Libre	https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover
Sentinel-2	2017-2021	10	n/a	Sí	Libre	https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/
Datos ambientales						
GAEZ v4	1961-2010	~1000	n/a	n/a	Libre	https://gaez.fao.org/
WorldClim	1970-2000	~1000	n/a	n/a	Libre	https://www.worldclim.org/

3.2.2 Arquitectura de Bases de Datos

Modelado de datos: personalización VS estandarización

Como se ha destacado en el capítulo anterior (Cap. II, 2.4.1 Diseño e implementación del proyecto), desde la propia conceptualización del estudio, el objetivo fue encontrar un equilibrio entre personalización y estandarización. Este enfoque resultó fundamental para diseñar los distintos modelos de datos que permitieran procesar de manera eficiente todo el flujo de información desde las fuentes originales, así como para el desarrollo y gestión de los conjuntos de datos generados durante el proyecto. La personalización implica crear estructuras específicamente adaptadas a las necesidades y el contexto de la investigación, lo que requiere de modelos que reflejen con precisión las variables y posibles relaciones significativas entre los datos en base a determinadas preguntas de investigación. No obstante, tal personalización también puede dificultar la accesibilidad e interoperabilidad con otros proyectos que siguen diferentes estándares (Noy & McGuinness, 2001). Por esta razón, la estandarización también desempeñó un papel central. Esto requiere el uso de estructuras predefinidas basadas en lenguajes semánticos y ontologías compartidas con otras iniciativas o proyectos (Berners-Lee, Hendler & Lassila, 2001). Así, este enfoque facilita la interoperabilidad —i.e., la capacidad de interactuar con otros sistemas y datos— y el intercambio de información, lo que permite cumplir con los criterios de apertura, accesibilidad y reutilización, principios básicos de la Ciencia Abierta (Marwick *et al.,* 2017).

Para el diseño de los distintos modelos de datos, por tanto, se optó por un enfoque híbrido que combinase una estructura sólida, modular e interrelacionada basada en elementos personalizados y estandarizados. A

partir de esta premisa, y considerando que uno de los objetivos durante las etapas iniciales de la investigación era identificar y documentar elementos arqueológicos dispersos a lo largo del territorio, se desarrollaron dos modelos de datos específicos con el propósito de gestionar y analizar toda la información asociada a cada sitio y ruta arqueológica. La principal motivación para este diseño radicó en que este tipo de información permitiría inferir patrones de asentamiento, movilidad y dinámicas sociales, junto a diversas variables medioambientales. Para alcanzar estos objetivos, los modelos fueron creados en un entorno SIG (ArcGIS v.10.5), lo cual posibilitaba la obtención, gestión, visualización y análisis de diversos tipos de datos de forma georreferenciada. Además, los modelos fueron diseñados para manejar una amplia variedad de información, que va desde la ubicación precisa de cada sitio y ruta documentada hasta aspectos asociados de tipo histórico, geográfico y ambiental (Figura 3.5). Esta estructura ha permitido normalizar los datos y aplicarlos de manera sistemática a cada registro, almacenándolos dentro de un *gazetteer.*

Un *gazetteer*, o nomenclátor en español, según la RAE (2024), es un catálogo de nombres propios que identifica lugares con una ubicación geográfica específica. En el ámbito de la investigación arqueológica, esta definición se amplía más allá de representar un mero índice de topónimos, proporcionando un marco de referencia espacial integral que combina atributos (nombres, ubicaciones, etc.), junto con datos contextuales cualitativos (descripciones, características culturales e históricas, etc.) y cuantitativos (medidas, estadísticas, etc.) sobre diversos lugares (Grossner *&* Mostern, 2021; Grunewald *&* Mostern, 2023). Esta estructura permite no solo la gestión de información precisa sobre determinados sitios arqueológicos, sino también su conexión con otras capas de datos e información, incluidas variables

socioeconómicas, medioambientales y temporales. En este contexto, hay que sumar la evolución de los *gazetteer* a su formato digital, lo cual ha potenciado significativamente su utilidad y alcance, permitiendo que estos puedan ser más accesibles, manejables y escalables, aumentando así su capacidad inferencial e interoperabilidad (Goodchild, 2007; Goocchild, Fu *&* Rich, 2007).

En definitiva, los modelos de datos fueron diseñados para responder de manera precisa y contextualizada a preguntas de investigación específicas, permitiendo abordar las cuestiones y objetivos planteados, al tiempo que estructuran la información de forma que se garantice la coherencia, claridad y facilidad de integración. Para lograrlo, se consideraron algunas de las ideas centrales propuestas por ADS y tDAR, junto a estructuras y vocabularios compartidos con otros proyectos que trabajan con datos abiertos, como los ya mencionados *EAMENA*, *Desert Networks* y/o *VIATOR-e* (Bewley *et al.*, 2016; Manière, Crépy *&* Redon, 2021; De Soto, 2021). Estas ideas y prácticas incluyen el uso de un lenguaje internacional común (inglés), la estandarización de los datos mediante el uso de formatos normalizados, la promoción de la accesibilidad y reutilización a través de repositorios digitales públicos, la generación de metadatos detallados y el desarrollo de estrategias para la preservación (digital) a largo plazo de los datos arqueológicos (Kintigh, 2006; McManamon *et al.*, 2017). Esta apertura se garantiza, por tanto, basándose en formatos estándar, fácilmente accesibles e interoperables para representar y describir los datos recopilados, procedimientos y resultados obtenidos, fomentando la transparencia y la colaboración en la investigación (Huggett, 2014). Este enriquecimiento semántico no solo permite una representación detallada de los datos e información, sino también el establecimiento de relaciones significativas, promoviendo la interoperabilidad y reutilización.

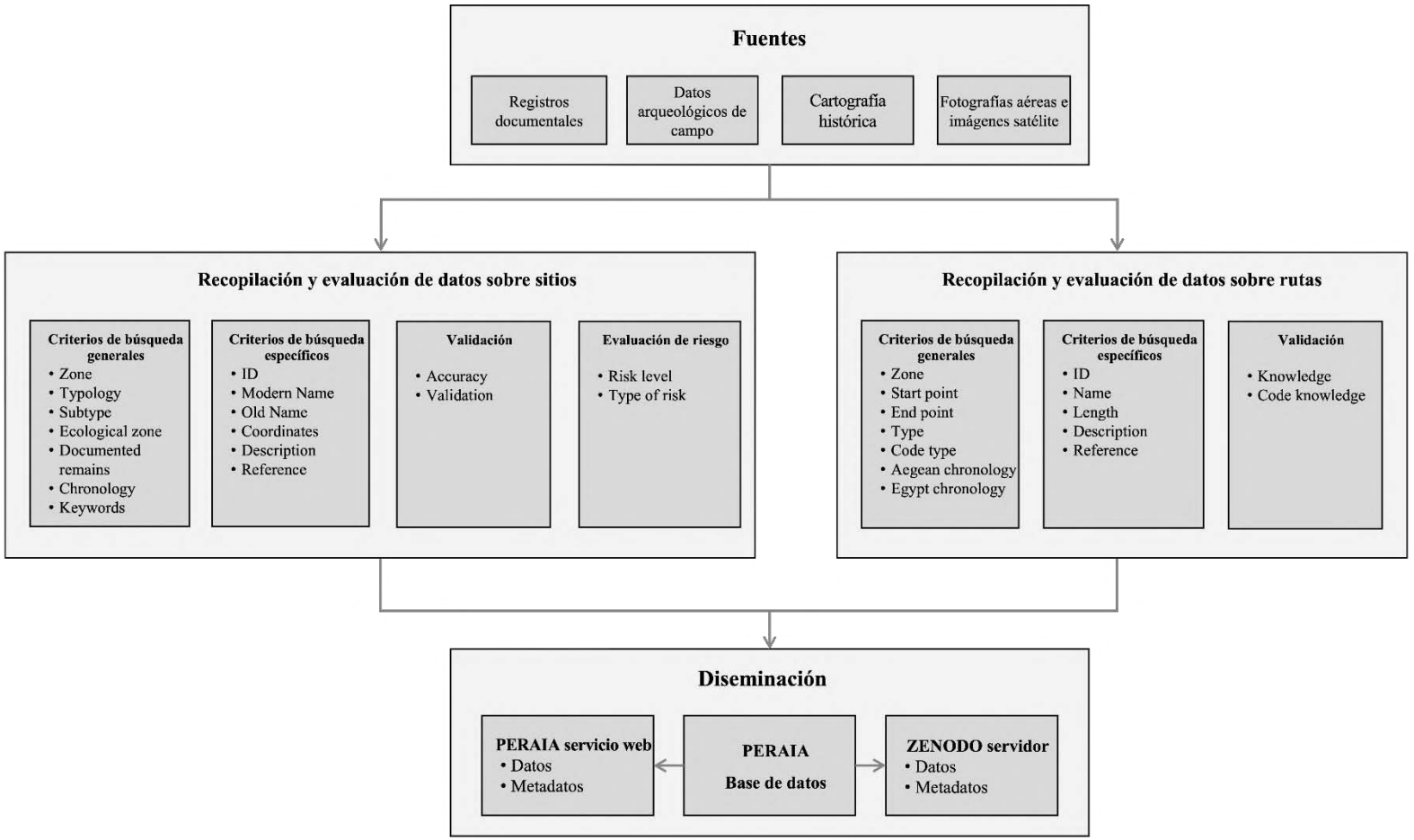


Figura 3.5. Modelo conceptual del proceso de recopilación, evaluación y difusión de los datos.

Exploración de datos: variables medioambientales y arqueológicas

En esta sección, se explora de manera detallada las diversas variables consideradas a lo largo de este estudio en base a determinados objetivos de investigación (los cuales se desarrollan en profundidad a lo largo de los siguientes capítulos). Estas variables pueden agruparse de forma genérica en dos categorías principales: medioambientales y arqueológicas. El primer grupo comprende factores de tipo geográfico y ambiental (p. ej., altitud, hidrología, temperatura, etc.), que son elementos esenciales para caracterizar el entorno e identificar la configuración y las dinámicas del paisaje. Por otro lado, el segundo grupo engloba las variables arqueológicas (p. ej., aspectos asociados a los asentamientos, lugares de enterramiento, estructuras de movilidad, etc.), las cuales representan los registros de la evidencia material y espacial de las actividades humanas, reflejando patrones y tendencias a diversas escalas espaciales y temporales (Herrera Malatesta, 2018). La combinación sumatoria de estas variables ha sido clave para evaluar cómo las condiciones naturales y las actividades humanas se influyen mutuamente (bidireccionalidad) a lo largo del tiempo (Crumley, 1994; McGlade, 1995). Esta perspectiva proporciona un marco contextual global para interpretar cómo las poblaciones de estas regiones habitaron y moldearon sus paisajes, considerando además diferentes agentes en estas dinámicas.

Cabe destacar, además, que dentro de las variables medioambientales se ha distinguido una serie de factores de primer orden, intrínsecamente relacionados con el nivel de influencia que ejercen (Connolly & Lake, 2009; Carrero-Pazos, 2017). Esto implica que los factores considerados de primer orden son aquellos que tienen un impacto directo y significativo en el

fenómeno o proceso analizado. En el contexto de este estudio, estos factores incluyen:

- **Altitud**: La elevación del terreno medida en el plano vertical respecto al nivel del mar. Esta variable tiene un impacto en el clima, la temperatura y la precipitación, las cuales determinan la ubicación de los asentamientos y las estrategias de subsistencia.

- **Pendiente**: La inclinación del terreno. Este elemento es esencial para comprender los procesos de erosión y drenaje, así como para la planificación de infraestructuras de movilidad y asentamientos.

- **Hidrología:** La presencia y características de cuerpos de agua y sistemas fluviales. Estos elementos son esenciales, ya que la disponibilidad de recursos hídricos influye de manera significativa en la localización de los asentamientos y en las prácticas para obtener y gestionar recursos básicos para su supervivencia.

- **Temperatura:** Las variaciones térmicas afectan a los ciclos de crecimiento de la vegetación, influyendo en la agricultura y las adaptaciones culturales.

- **Precipitación:** La estacionalidad y cantidad de lluvia que cae en una región afecta a la disponibilidad de agua, determinando las estrategias de subsistencia.

- **Características del suelo (Geomorfología):** La configuración y características del suelo, incluyendo formaciones geológicas, toxicidad, salinidad, etc., condicionan la productividad y las técnicas de uso y aprovechamiento del terreno.

- **Cobertura del terreno:** La tipología y distribución de la vegetación y los diversos usos del suelo revelan patrones históricos y cambios en el paisaje debidos a las actividades humanas.

En cuanto a las variables arqueológicas, su identificación y evaluación se llevó a cabo siguiendo un esquema de clasificación en base a la tipología y distribución espacial que presentan estos elementos. Es importante señalar que cada sitio de interés se ha representado únicamente como un punto en el espacio —i.e., un vector, el cual es uno de los dos principales modelos de datos para representar entidades geográficas en un entorno SIG— y no se ha tenido en cuenta su extensión o tamaño original. A pesar de esta limitación, esta geometría simplificada presenta dos ventajas: (i) puede aplicarse de forma coherente a todos los sitios, independientemente de la información disponible que se tenga de ellos; y (ii) se adapta mejor a la arquitectura espacial necesaria para estudios de densidad y análisis de las pautas de distribución en estas regiones. Por otra parte, en el caso específico de las rutas documentadas, estas sí han sido digitalizadas acorde a su extensión y recorrido original. De este modo, los elementos arqueológicos registrados se encuentran inicialmente categorizados en base a la siguiente tipología:

- **Asentamientos**: Engloban diversos tipos de evidencia de ocupación humana, independientemente de su tamaño o extensión original. Incluyen viviendas, asentamientos rurales, ciudades, etc.

- **Lugares de enterramiento**: Comprenden enterramientos individuales, colectivos, cementerios y otro tipo de estructuras funerarias.

- **Áreas productivas**: Incluyen áreas funcionales, zonas agrícolas, salinas, lugares de producción artesanal, etc.

- **Zonas históricas de captación de recursos**: Se refieren a zonas donde se obtienen recursos naturales básicos para la subsistencia y el desarrollo socioeconómico de estas comunidades, tales como estructuras para la obtención, almacenamiento y gestión de recursos hídricos (especialmente consideradas en el caso de Marmárica).

- **Rutas históricas**: Comprenden rutas, caminos, senderos, u otros corredores de movilidad.

Esta clasificación general se complementa con un análisis detallado de las características e información asociada a cada sitio y ruta documentada, la cual se integra en modelos de datos específicamente diseñados para este propósito. En este sentido, a cada sitio se le asigna una subtipología que define de forma más precisa su naturaleza y funcionalidad (p. ej., puerto, granja, fuerte, cisterna, etc.). Además, se integra la descripción del sitio, indicando la naturaleza y periodización del material arqueológico documentado —en función de la presencia y ausencia, en lugar de su dimensión cuantitativa—, junto a cualquier otra característica o información significativa relacionada. De manera similar, se siguió el mismo proceso con cada ruta documentada, asignándoles tipologías específicas (p. ej., rutas principales, secundarias o caminos), e integrando toda la información contextual asociada (véase Cap. III, 3.2.3. *Gazetteer* de sitios y 3.2.4. *Gazetteer* de rutas). De este modo, se identificaron patrones y variaciones en el uso del terreno, los recursos y las dinámicas de movilidad y poblamiento, contextualizando cada sitio y ruta arqueológica, y posibilitando el análisis comparativo y temporal de estos elementos.

Este enfoque se complementa con la inclusión de una serie de condicionantes adicionales que permiten evaluar el impacto de factores antropogénicos (relacionados con la actividad humana) y medioambientales (relacionados con el entorno natural). En este estudio, se han identificado como factores significativos la proximidad a zonas urbanas (ciudades, complejos hoteleros, urbanizaciones, etc.), áreas agrícolas (zonas de cultivo, sistemas de irrigación, producción agrícola, etc.) e infraestructuras de movilidad (carreteras, líneas de tren, aeropuertos, etc.). Estos elementos reflejan no solo los patrones históricos de ocupación y uso del territorio, sino también la presión contemporánea sobre el patrimonio arqueológico en términos de desarrollo regional. Además, se ha valorado como un factor relevante las amenazas que enfrenta el patrimonio arqueológico en regiones que históricamente sufren o han sufrido periodos de inestabilidad política (Casana, 2015; Pollock, 2016; Casana & Laugier, 2017; Hobson, 2019). Las condiciones socioeconómicas y políticas actuales, por tanto, deben entenderse como parte integral de la evaluación de riesgos para el patrimonio en estas áreas.

En cuanto a los condicionantes medioambientales, se han considerado generalmente los procesos naturales de erosión (acelerados también por la acción humana), modificaciones en las líneas de costa y otras alteraciones debidas al cambio climático (Vousdoukas *et al.,* 2022). Este planteamiento ha permitido obtener una comprensión más completa de la historia coevolutiva entre factores humanos y no humanos y sus posibles impactos en el paisaje arqueológico. Por lo tanto, el marco de análisis desarrollado no solo mejora la comprensión de los fenómenos estudiados, sino que también posibilita el desarrollo de estrategias y políticas de gestión y conservación informadas y adecuadas a estas regiones.

Escalas espacio-temporales

Los criterios empleados para identificar e incluir registros arqueológicos en los modelos de datos se basaron en un rango temporal amplio que abarca desde el Bronce Final hasta el periodo romano (*ca.* 1400 a.C. - 300 d.C.). La decisión de excluir registros fuera de esta cronología se fundamenta principalmente en las limitaciones de tiempo y recursos disponibles en este proyecto. No debemos olvidar que se trata de una investigación exploratoria y requiere de estudios con mayor profundidad en el futuro. No obstante, la periodización específica adoptada responde a una serie de periodos culturales y procesos históricos que son de interés, y que están estrechamente relacionados con las preguntas y objetivos de investigación planteados.

El inicio del estudio en el siglo XV a.C. (LM-IIIA / Reino Nuevo) se justifica debido a que durante este periodo se produce la expansión de los contactos micénicos desde el Egeo, reemplazando los intereses cretenses y ampliando las rutas comerciales minoicas en el Mediterráneo (Broodbank, 2013; Tartaron, 2013). Este fenómeno está respaldado por la aparición de numerosos objetos de producción micénica especialmente en asentamientos del Egeo, Chipre, el Levante, el noreste de África y el valle del Nilo (Vivas Sainz, 2013; Knapp *&* Demesticha, 2017; Gheorghiade, 2020, entre otros). Además, estas redes de comunicación mantenían una fuerte vinculación con Creta, como demuestran los restos materiales documentados en sitios como Kommos (Shaw, 1989, Watrous, 1985, 1992; Johnston, 2005; Tomlison, Rutter *&* Hoffman, 2010, Day *et al.*, 2011; entre otros). Un ejemplo representativo es la producción en serie de jarras de transporte conocidas como *Stirrup Jars*, distribuidas ampliamente por el Mediterráneo oriental entre los siglos XV y XII a.C. (Knapp *&* Demesticha, 2017). Esta evidencia es una muestra más de los intensos contactos entre los asentamientos cretenses y lugares del noreste de África

(Marmárica), como Bates' Island o el fuerte de época ramésida de Zawiyet Umm el-Rakham (Bates, 1914; White & White, 1996; Nibbi, 1998; Snape, 2000, 2001, 2013; Hulin & White, 2002; Hulin, 2011, 2018; Nielsen, 2017, 2024; entre otros). En cuanto a la decisión de detener el estudio en torno al siglo IV d.C. (Época romana) se fundamenta en el reconocimiento de este periodo como un punto de inflexión significativo, marcado por la transición del Imperio Romano al Imperio Bizantino (Chevrollier, 2016; Moorey, 2019; Bagnall, 2021). Este cambio tuvo profundas implicaciones en la organización política, económica y social de las regiones estudiadas, justificando así la delimitación temporal de la investigación.

Es fundamental señalar que este estudio aborda diversas regiones, cronologías y tradiciones historiográficas, lo que añade complejidad a la hora de establecer un marco cronológico común para los registros arqueológicos documentados. Para superar este desafío, se estableció una secuencia temporal comparativa basada en diversas fuentes. Estas incluyen el *Digital Egypt for Universities*, desarrollado por el *University College London* (UCL) en el *Bartlett Centre for Advanced Spatial Analysis* (CASA) para el *Petrie Museum*, en el caso de Egipto; el *UNESCO Libyan Valleys Archaeological Surveys* para Libia; y la cronología proporcionada por Livingston Vance Watrous en *The Plain of Phaistos: Cycles of Social Complexity in the Mesara Region of Crete*, para Creta (Barker *et al*., 1996; Grajetzki & Quirke, 2000; Watrous, Chatzē-Vallianou & Blitzer, 2004). Estos recursos nos han permitido establecer una base cronológica sólida y comparativa (Tabla 3.2), facilitando así una evaluación efectiva entre las diversas realidades que enfrentamos y ampliando nuestra comprensión del contexto histórico de territorios que comprenden regiones de las actuales Grecia, Libia y Egipto.

Tabla 3.2. Escalas espacio-temporales de la investigación.

Temporalities	Cultural period		Date
	Crete	Marmarica	
Late Bronze Age	Late Minoan IIIA Late Minoan IIIB Late Minoan IIIC (Subminoan)	New Kingdom	15th – 11th BCE
Early Iron Age	Protogeometric Geometric Orientalizing	Third Intermediate Period	11th – 7th BCE
Archaic (Iron Age)	Archaic		
Classical	Classical	Late Period	7th - 4rd BCE
Hellenistic	Early Hellenistic Late Hellenistic	Ptolemaic Period	4rd – 1st BCE
Roman	Roman period		1st BCE – 4rd CE

De este modo, se exploran diferentes ventanas cronológicas dentro de la línea temporal establecida, basándose en la idea de que los procesos históricos pueden ser comprendidos en diversas escalas temporales (Braudel, 1949/2019). Estas escalas incluyen procesos a largo plazo que establecen el marco general de la historia cultural de estas regiones, siendo divididos artificialmente mediante el uso de acontecimientos específicos como puntos de ruptura. Cada nuevo período comienza tras una crisis en el período anterior, reflejando momentos de inestabilidad que no pueden ser resueltos dentro del marco del sistema existente. En segundo lugar, están los períodos intermedios que representan ciclos de estabilidad, donde este balance implica un equilibrio de fuerzas más que la idea de progreso dentro de estos procesos a largo plazo —aunque eventualmente pueden llevar a interrumpir la continuidad de estos. Finalmente, los eventos o crisis a corto plazo introducen cambios inmediatos que pueden influir significativamente a nivel sistémico. La argumentación central parte del supuesto de que, para comprender completamente los procesos históricos y la evolución de las dinámicas socioecológicas a largo plazo en estas regiones, es necesario considerar múltiples escalas temporales, ya que cada una de estas ofrece una perspectiva distinta pero complementaria sobre cómo se desarrollan y cambian las estructuras sociales, políticas, económicas y culturales a lo largo del tiempo (Wallerstein, 2004; Hinojosa-Baliño, 2022).

Una vez establecida la secuencia temporal común (Tabla 3.2), cada registro arqueológico fue asociado a un tramo temporal, identificado a partir de la información obtenida sobre los restos materiales documentados, análisis de sedimentación del suelo y/o rasgos arquitectónicos identificados durante los trabajos arqueológicos de campo realizados. Estos datos fueron recopilados

mediante prospecciones de campo, informes técnicos de excavación y artículos de investigación publicados. Así, la información contenida en el campo "Temporalidades" (*Temporalities*) en la Tabla 3.2 corresponde a la cronología asignada a cada sitio y ruta documentada en los modelos de datos. En los casos en que no se conocía la cronología precisa de un sitio, este se clasificó como "Desconocida" (*Unknown*). Además, en el caso de las rutas, se incluyeron todos los caminos, senderos o rutas premodernas documentadas en estas regiones. La principal razón para considerar elementos más allá de los límites cronológicos establecidos, siguiendo el argumento de Vetter, Rieger y Möller (2013), radica en que el carácter diacrónico de estas infraestructuras de movilidad podría ser indicativo de antiguos desplazamientos.

Gestión de la incertidumbre y datos incompletos

Las distintas fuentes, recursos y datos consultados fueron fundamentales para identificar y contextualizar el patrimonio arqueológico y cultural de estas regiones. Sin embargo, estas fuentes de información también presentan incertidumbres inherentes. Por ejemplo, la precisión de la cartografía histórica utilizada suele variar, afectada por la tecnología y los conocimientos disponibles de la época. Del mismo modo, esta variabilidad también se manifiesta en los diferentes niveles de información que proporcionan las fuentes. Incluso aquellos datos obtenidos mediante mediciones directas en trabajos de campo —y, por tanto, considerados como absolutos—, van acompañados de un cierto grado de incertidumbre. A ello hay que sumar que generalmente muchos de estos datos carecen de metadatos —i.e., los datos que describen y proporcionan información sobre otros datos— que expliquen de manera detallada su creación o finalidad, así como los procedimientos

aplicados a la hora de obtenerlos (García-Álvarez *et al.*, 2019). Este panorama planteó un reto significativo para la investigación, lo que llevó a considerar cómo estas numerosas incertidumbres podían impulsar nuevas aproximaciones destinadas a mitigar su impacto.

Para hacer frente a este reto, durante el proceso de mapeo arqueológico fue esencial implementar tanto una validación formal, basada en el cruce y comparación de diversas fuentes de información, como la aplicación de escalas de validación específicas, creadas *ad hoc* en el marco de esta investigación (véase Tablas 3.3 y 3.4 para ejemplos de las escalas específicas aplicadas a los sitios arqueológicos) (Laguna-Palma, Toscano & Rodríguez-Rellán, 2023, 2024). Estas escalas cumplieron con dos funciones principales. En primer lugar, establecieron un marco riguroso de sistematización, fundamental para garantizar la coherencia y normalización de las fuentes y el tratamiento de los datos. Más importante aún, este marco mejoró la precisión general de la localización geográfica de las evidencias arqueológicas registradas y permitió evaluar el nivel de confianza depositado en las fuentes utilizadas. Esto resultó clave, ya que la exactitud en la localización tiene un impacto significativo en la contextualización de estos elementos y, posteriormente, en la interpretación de los resultados. En segundo lugar, las escalas proporcionaron una forma estructurada de cuantificar y comunicar las incertidumbres inherentes a los datos. Esto es esencial para garantizar la transparencia de la investigación, ya que permite a otros arqueólogos/as comprender las limitaciones de los datos obtenidos y reevaluar, si es necesario, las conclusiones extraídas a partir de ellos.

Tabla 3.3. La variable "*Accuracy*" (Precisión) se refiere a la evaluación de la proximidad entre la ubicación geográfica real de los sitios y la posición registrada en el marco de esta investigación.

ACCURACY	DESCRIPTION
High	Anomaly detected [accurate and precise]
Intermediate	Anomaly detected [accurate, but not precise]
Low	No anomaly [neither accurate, not precise]

Tabla 3.4. La variable "*Validation*" (Validación) se basa en el nivel de confianza atribuido a las fuentes utilizadas para contrastar y recopilar información sobre los sitios arqueológicos.

VALIDATION	DESCRIPTION
4	Contrasted anomaly [various sources and verified on the field]
3	Contrasted anomaly [all positive evaluations, except on the field]
2	Not contrasted anomaly [cartographic data and satellite imagery]
1	No anomaly [digitisation based on sources]

Finalmente, a pesar de los desafíos presentados por las numerosas incertidumbres que rodean a los datos, este estudio ha logrado avanzar significativamente en la identificación y contextualización del patrimonio arqueológico de estas regiones. La incertidumbre es una parte inevitable de todo proceso de investigación; sin embargo, la implementación de mecanismos de validación específicos ha demostrado ser una estrategia efectiva para mitigar sus efectos. Estas aproximaciones no solo mejoran la precisión de los datos recopilados, sino que también proporcionan vías para una mayor transparencia y comunicación. Esto resulta fundamental para permitir una evaluación crítica por parte de otros investigadores/as y, de este modo, fortalecer la validez y replicabilidad del estudio.

Tratamiento de datos e información (Open Data)

Aunque este tema será tratado con mayor profundidad en los próximos capítulos (Cap. VI La importancia de la "apertura" en la investigación arqueológica), es importante destacar brevemente que las tecnologías digitales y los principios FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable*) y LOUD (*Linked Open Usable Data*) han revolucionado la gestión de los datos en el ámbito de la investigación, enfatizando la necesidad de su apertura y reutilización (Marwick *et al.,* 2017; Thiery, 2019; Wilkinson *et al.,* 2016). No obstante, las administraciones o proyectos que priorizan la publicación de datos de tipo arqueológico e histórico siguen siendo escasos, especialmente en regiones poco representadas. Este escenario pone de manifiesto una brecha significativa y ha llevado a profundizar en las diferentes estrategias necesarias para garantizar prácticas abiertas en la publicación y difusión de los datos y resultados de investigación.

Por lo tanto, se implementaron métodos digitales no solo para agilizar los procesos de verificación y armonizar los datos e información procedentes de diversas fuentes, sino también para fomentar la apertura y transparencia de los procedimientos y criterios aplicados (Huggett, 2014). Con este objetivo, se establecieron prácticas para la creación y publicación de datos basadas en los principios FAIR (Wilkinson *et al.,* 2016). Además, para garantizar su intercambio y reutilización de forma generalizada, se trabajó para asegurar que todos los datos también pudieran adherirse a los principios LOUD, cumpliendo así con el compromiso hacia los principios de la Ciencia Abierta (Marwick *et al.,* 2017; Thiery, 2019).

Un paso fundamental en esta dirección ha sido la implementación de un servicio web público para el proyecto (https://peraia.es/). Este desarrollo se realizó mediante la selección de una plataforma (WordPress), considerando factores como la facilidad de uso, la seguridad y la escalabilidad. Para fomentar la apertura y la reutilización, los datos se han almacenado en un formato no propietario y fácilmente manejable (CSV). La interfaz del servicio, además de proporcionar la opción de descarga de los datos, permite realizar consultas generales y específicas a través de herramientas de filtrado e incluye un mapa interactivo creado con la tecnología de Carto (https://carto.com/). Complementariamente, la base de datos, junto con todos los metadatos asociados, ha sido almacenada y publicada en Zenodo (https://zenodo.org/), un repositorio de acceso abierto desarrollado en el marco de la Unión Europea.

De este modo, todo el conjunto de datos es accesible al público a través de dos URI, lo que proporciona redundancia: una mantenida por el proyecto y otra que utiliza el protocolo DOI. Adicionalmente, para asegurar la interoperabilidad, se han empleado formatos estándar para la representación y descripción de los datos, y todos los registros recopilados han sido sometidos a un riguroso proceso de revisión para verificar su integridad, coherencia y plausibilidad. Finalmente, la reutilización, uno de los principios fundamentales de este proyecto, está respaldada por la licencia *Creative Commons Attribution 4.0 International*, que permite la redistribución y uso de los datos, siempre que se acredite adecuadamente al creador y se apruebe su uso bajo los principios de *Free Cultural Works*.

3.2.3 *Gazetteer* de sitios arqueológicos

Estructura y formato de los registros

En este apartado, se presenta la estructura y formato del *gazetteer* específico para los sitios arqueológicos. Este primer modelo de datos se ha diseñado mediante una estructura robusta y modular para almacenar de manera eficiente toda la información asociada a cada sitio de interés. Es importante destacar que el modelo no está concebido como una estructura estática o cerrada, sino que está pensado para que pueda expandirse o modificarse según las necesidades específicas de la investigación, aumentando así su capacidad inferencial. Asimismo, la estructura y formato de los registros han sido diseñados para garantizar la facilidad de uso e interoperabilidad, incluyendo descripciones estandarizadas y metadatos detallados. Esto no solo mejora la accesibilidad y manejabilidad de los datos, sino que también los hace más escalables, ampliando su alcance e impacto.

De este modo, cada registro se vinculó sistemáticamente junto con su información contextual, en base a las variables enumeradas en la Tabla 3.5. Algunos de estos elementos básicos (p. ej., ID, Nombre (*Name),* Tipología *(Typology),* Coordenadas *(Coordinates),* Cronología *(Chronology),* Palabras clave *(Keywords),* Descripción *(Description)* o Referencias *(Biblio_Ref*) se pueden encontrar en otros conjuntos de datos, lo que proporcionó una estructura semántica coherente que se siguió por razones de interoperabilidad. Además, estos elementos se complementan con campos específicos (p. ej., Zona *(Zone*), Zona ecológica *(Ecological Zone),* o Restos documentados *(Documented remains*). También se incluyeron campos para integrar las escalas de validación (*Accuracy* y *Validation*), así como para la evaluación del riesgo de amenazas potenciales (*Risk_Level* y *Cod_Risk*).

Tabla 3.5. Estructura y formato de los registros de los sitios arqueológicos.

VARIABLE	TYPE	DESCRIPTION
ID	string	This is the unique site number defined by the project (e.g., PE_00002). The two-letter prefix indicates the project name, and the following numbers identify each site
Zone	numeric	This number identifies the corresponding zone of a site (i.e., 1 = Crete / 2 = Eastern Marmarica / 3 = Western Marmarica)
Modern_Name	string	Current name of the site or place
Old_Name	string	Ancient name of the site as documented in the sources
Coord_x	numeric	WGS 84 / UTM zone 35N [projected] [EPSG:32635]
Coord_y	numeric	WGS 84 / UTM zone 35N [projected] [EPSG:32635]
Accuracy	string	Scale that defines the accuracy of a site's location
Validation	numeric	Scale that defines the level of confidence provided by the sources
Type	string	General typology of the sites (e.g., settlement, burial place, etc.)
Subtype	string	Specific typology of the sites (e.g., harbour, tomb, etc.)
Eco_Zone	string	Ecological zone where the site is located
Risk_Level	string	Scale that defines the likelihood of destruction related to potential risks
Cod_Risk	string	Number that identifies the type of threats
Remains	dichotomous	If documented remains exist (Yes/No)
Chronology	string	Phases of human occupation of the sites
Keywords	string	Any relevant term or information used to identify the site
Description	string	The site description indicates the nature of the archaeological material observed, or any contextual information related to the site
Biblio_ref	string	Sources used for site identification and description

Evaluación de riesgos

El paisaje arqueológico de estas regiones posee características únicas y marcadas vulnerabilidades derivadas de procesos antropogénicos y medioambientales. Muchas de las zonas estudiadas se caracterizan por condiciones áridas y semiáridas (especialmente en el noreste de África), mientras que otras han sufrido rápidas transformaciones debido al incremento de las actividades de desarrollo regional, como la expansión urbana, la construcción de carreteras y la intensificación de las prácticas agrícolas. A ello se suman otros efectos tales como la erosión natural, alteraciones de las líneas de costa y variaciones en la temperatura o precipitación debido al creciente impacto del cambio climático (Sheldrick & Zerbini, 2017; Breen *et al.,* 2022; Westley *et al.,* 2023). En consecuencia, la conservación de los sitios patrimoniales en estas regiones enfrenta desafíos sin precedentes, lo que conduce a su rápida desaparición en zonas que aún hoy día siguen siendo poco conocidas.

Por este motivo, un aspecto fundamental, aunque quizás no tan vinculado a los objetivos iniciales de esta investigación, ha sido la evaluación exhaustiva de los riesgos potenciales a los que están expuestos estos lugares. Esta decisión fue influida por la observación, durante el proceso de mapeo arqueológico, de que muchos de estos sitios se encontraban en procesos avanzados de deterioro o incluso ya habían desaparecido. En respuesta a esta problemática, se integraron determinadas variables en los modelos de datos con el propósito tanto de identificar la tipología de los riesgos a los que estaban expuestos los sitios registrados como de evaluar su impacto potencial. Este enfoque facilitó la identificación de zonas críticas donde las presiones derivadas del desarrollo regional son más significativas, así como áreas donde los factores

medioambientales pueden acelerar la destrucción del patrimonio arqueológico.

De modo que cada sitio documentado fue analizado de manera sistemática utilizando los criterios establecidos en el marco de evaluación de riesgos descrito en la Tabla 3.6. Este marco, creado específicamente en el contexto de esta investigación, abarca las principales amenazas para la conservación del patrimonio en las regiones estudiadas. Cabe destacar que una de las categorías específicas consideradas en estas evaluaciones fue denominada como "Conflicto" (*Conflict*), que incluye acciones directa o indirectamente relacionadas con conflictos armados o inestabilidad política en determinadas regiones. Un ejemplo representativo de esta categoría es el saqueo, una actividad que tiende a intensificarse durante los periodos de inestabilidad política (Di Lernia *&* Gallinaro, 2014; Bowen *et al.,* 2017; Casana, 2015; Parcak *et al.,* 2016; Casana *&* Laugier, 2017; Hobson, 2019). Aunque no tan frecuente en el ámbito de este estudio en comparación con otras regiones, esta práctica ilegal puede identificarse fácilmente mediante reconocimiento aéreo, lo que representa un alto riesgo para la conservación del patrimonio arqueológico. Así, este marco integra mecanismos para identificar y registrar cada amenaza potencial mediante un código específico que hace referencia a su naturaleza. Además, se introdujo una variable que representa la escala de probabilidad de riesgo, basada en el grado de influencia que ejerce cada amenaza. Es importante señalar que este enfoque también se extiende a los sitios que presumiblemente ya han desaparecido. En tales casos, el tipo de riesgo se clasifica como "Indeterminado" (*Undetermined*), dado que las estructuras ya no son visibles a nivel de superficie o han sido completamente destruidas.

Tabla 3.6. Marco de evaluación de riesgos. La tabla ilustra la relación entre la escala de probabilidad de riesgo, los tipos de amenazas potenciales y los códigos que identifican cada una de ellas.

LIKELIHOOD	TYPE	CODE	DEFINING RISK
High	Urban	6	Urban expansion covers the construction of housing developments, industrial installations, hotel complexes, and road infrastructures
	Agriculture	5	Expanding agricultural lands and developing farming practices have an impact on nearby heritage sites
	Conflict	4	Armed conflicts or political instability generate several threats to heritage, including looting (e.g., identified by illegal systematic digging holes on the sites)
Moderate	Sea level rise	3	Sea level rise and potential coastal flooding impact areas
	Erosion	2	Erosion is a natural surface process resulting from the action of wind or water flow but also accelerated by anthropic activities
Low	Undetermined	1	It is not possible to assess the risk, either because it is not identified or because the site is destroyed

Este enfoque global permitió rastrear los cambios derivados de los impactos humanos y las condiciones medioambientales en torno a los sitios arqueológicos, así como sus efectos potenciales para su preservación a largo plazo. De esta manera, se ha podido evaluar y comprender mejor el estado actual de conservación de estos lugares y establecer una base de referencia para posibles acciones de protección sobre este patrimonio. Además, este enfoque facilita la creación de marcos comparativos que permiten analizar y contrastar estas evaluaciones en otros contextos y regiones geográficas.

Escalas de validación

Como se ha destacado en secciones anteriores, somos conscientes de las incertidumbres que rodean a los datos, hecho más relevante si cabe cuando se trata de trabajar con la naturaleza fragmentaria que representa el registro material de las sociedades del pasado. Por ello, es importante reconocer que todos los datos y, por consiguiente, los análisis que se realizan a partir de ellos implican cierto grado de incertidumbre. Aunque esta problemática es ampliamente reconocida, la implementación de mecanismos específicos para reducir o mitigar su impacto no es tan común (Hugget, 2015; García-Álvarez *et al.,* 2019; Hariri, Fredericks *&* Bowers, 2019; Tobalina-Pulido *&* González-Pérez, 2020; González-Pérez *et al.,* 2023). En este estudio, que trata de analizar y comprender diversos patrones y dinámicas a largo plazo mediante el uso de diferentes *proxies* —i.e., indicadores indirectos de los fenómenos estudiados—, ha sido fundamental desplegar estrategias que no solo permitan reconocer y comunicar las incertidumbres inherentes a los datos, sino también implementar mecanismos específicos para manejarlas y reducir su impacto.

Para abordar esta problemática, durante el contexto de esta investigación se desarrollaron diversas escalas de validación basadas en la precisión y validación en la localización y contextualización de los sitios arqueológicos (Tabla 3.7a y 3.7b). En primer lugar, la variable *Accuracy* (Precisión) engloba dos criterios o métricas específicas: (i) cada sitio digitalizado se clasifica según el grado de evidencia observada, es decir, si la anomalía que identifica al sitio es detectable o no en las imágenes; (ii) también se evalúa la diferencia entre la ubicación geográfica real y la localización registrada durante el proceso de mapeo. Para conocer la ubicación geográfica de los sitios, se considera la exactitud proporcionada por las fuentes, es decir, si se dispone de más de una

fuente que indique la ubicación precisa de un sitio, o si la fuente proporciona las coordenadas exactas para localizarlo. En segundo lugar, se introdujo la variable *Validation* (Validación), una variable cualitativa basada en el nivel de confianza depositado en las fuentes. Esta variable es crucial para contrastar y validar la información contextual obtenida sobre cada sitio. Además, se utiliza para determinar la naturaleza de las fuentes consultadas, asegurando diferentes niveles de confiabilidad de la información proporcionada para el conjunto de datos.

Tabla 3.7a. Ejemplo de sitio arqueológico junto con las variables *Accuracy* y *Validation*.

VARIABLE	EXAMPLE
ID	PE_00004
Zone	2
Modern_Name	Zawiyet Umm el - Rakham
Old_Name	Unknown
Coord_x	27.025833
Coord_y	31.4
Accuracy	High
Validation	4
Type	Settlement
Subtype	Fort
Eco_Zone	Coastal zone and northern tableland
Risk_Level	High
Cod_Risk	5, 6, 7
Remains	Yes
Chronology	Late Bronze
Keywords	New Kingdom, Ramesside period, Cannanite amphora, Stirrup-jar
Description	Located on the Marmarica coast of Egypt, 20km to the west of Marsa Matruh. During the Ramesside period, it was the location of a major fort which probably marked the western extent of Egyptian influence.
Biblio_ref	Snape, 2001: 19-20, 2007, 2015; Hulin, 2009; Nielsen, 2017; 2023

Tabla 3.7b. Metadatos que detallan las escalas de validación, abarcando campos para la precisión en la digitalización y el nivel de confianza asociado a las fuentes.

VALIDATION SCALE	
ACCURACY	
Closeness degree based on evidence	**Description**
High	Anomaly detected [accurate and precise]
Intermediate	Anomaly detected [accurate, but not precise]
Low	No anomaly [neither accurate, not precise]
VALIDATION	
Level of confidence (Numeric value)	**Description**
4	Contrasted anomaly [various sources and verified on the field]
3	Contrasted anomaly [all positive evaluations, except on the field]
2	Not contrasted anomaly [cartographic data and satellite imagery]
1	No anomaly [digitisation based on sources]

Por lo tanto, este enfoque aborda de manera integral las incertidumbres inherentes a los datos, en primer lugar, mediante transparencia y comunicación y, en segundo lugar, mediante la implementación de escalas de validación específicas para ayudar a mitigar su impacto. Estas aproximaciones no solo mejoran la precisión y confiabilidad en la localización y contextualización de los sitios arqueológicos, sino que también permiten una evaluación crítica y sistemática de los propios datos y fuentes utilizadas, facilitando la identificación y comunicación de posibles sesgos en los niveles de información empleados. Esto es crucial, ya que al documentar y comunicar de manera exhaustiva los procedimientos y criterios aplicados, se mantiene la transparencia de la investigación, promoviendo un diálogo abierto y constructivo donde otros arqueólogos/as pueden replicar y contrastar estos resultados.

3.2.4 *Gazetteer* de rutas históricas

Estructura y formato de los registros

El diseño de un modelo de datos específico para las rutas históricas representó otro paso fundamental de esta investigación. Este modelo está concebido como una estructura robusta y modular para la base de datos espacial, con el propósito principal de almacenar y gestionar de manera eficiente todos los datos e información asociados con cada ruta, sendero o camino tradicional. La modularidad del diseño ofrece una estructura flexible, que permite la incorporación de diversas variables y datos de acuerdo con las necesidades y objetivos establecidos. De manera similar, también se han considerado ontologías y vocabularios compartidos con otros proyectos para asegurar la estandarización e interoperabilidad (p. ej., *Viator-e*, *Desert Networks*, etc.). Adicionalmente, el registro y documentación de este tipo de evidencia proporciona modelos que pueden ser comparados con otros obtenidos sobre patrones de movilidad y flujos de interacción históricos durante las fases de análisis espacial y la aplicación de métodos de ciencia de redes durante este estudio.

De este modo, cada ruta fue identificada y registrada sistemáticamente en base a las variables descritas en la Tabla 3.8. Al igual que ocurre con el *gazetteer* de los sitios, este modelo integra elementos básicos presentes en otros conjuntos de datos, como ID, Nombre (*Name*), Tipología (*Typology*), Descripción (*Description*) o Referencias (*Biblio_Ref*), para los que se ha seguido la misma estructura semántica siempre que ha sido posible. El modelo también incluye campos personalizados y adaptados a las necesidades específicas de esta investigación, como Zona (*Zone*), Longitud en Km (*Length*), o un código asociado a la tipología (*Cod_Type*). Además, siguiendo la hipótesis

de direccionalidad de las rutas planteada en este estudio, se asignó un punto de inicio (*Start_point*) y un punto final (*End_point*) para cada una de ellas. También se integró una escala de validación basada en el nivel de conocimiento sobre este tipo de evidencia, junto a un código identificativo asociado (*Knowledge y Cod_Know*). Finalmente, dado que en el caso específico de las rutas documentadas se incluyeron también aquellas que exceden de los límites cronológicos establecidos en el marco temporal de esta investigación, se añadieron dos campos relacionados que recogen la periodización precisa de estos elementos tomando como referencia Egipto para el noreste de África (*Egypt_chr*) y el Egeo para Creta (*Aegean_chr*). Este enfoque permite situar las rutas en un contexto comparativo y temporal más amplio (diacronía), más allá de los límites establecidos por esta investigación.

Tabla 3.8. Estructura y formato de los registros de las rutas históricas.

VARIABLE	TYPE	DESCRIPTION
ID	string	This is the unique route number defined by the project (e.g., PE_NET0004). The two-letter prefix indicates the project name, and the following letters and numbers uniquely identify each route
Zone	string	This number identifies the corresponding zone of a route (i.e., 1 = Crete / 2 = Eastern Marmarica / 3 = Western Marmarica)
Name	string	Ancient or current name of the route
Length	numeric	Length of the route measured in kilometers
Type	string	Specific typology of the routes (e.g., main route, secondary route, tracks, or paths).
Cod_Type	numeric	Code that identifies the route typology
Knowledge	string	Scale that defines the level of knowledge about the route

Cod_Know	numeric	Code identifying the level of knowledge with each route
Start_point	string	Starting point of the route
End_point	string	End point of the route
Aegean_chr	string	Chronology and terminology of Aegean history.
Egypt_chr	string	Chronology and terminology of Egyptian history.
Description	string	Description of the route, indicating the nature of the connected archaeological sites or any contextual information related to the route
Biblio_ref	string	Sources used for route identification and description

Tipología de rutas

Al describir la estructura y formato de los registros del *gazetteer* específico para las rutas, se observa que dos de los campos están destinados a categorizar este tipo de evidencia según su tipología (*Typology*). Esta clasificación, desarrollada en el marco de esta investigación, establece tres categorías genéricas: rutas principales, secundarias y caminos o senderos. Cada una de ellas acompañada además de un código identificativo (*Cod_Type*), para facilitar su gestión y análisis. Esta categorización está fundamentada en una serie de criterios previamente definidos para capturar las particularidades funcionales y estructurales de las redes de movilidad históricas. En el contexto de este estudio, estos criterios son:

- **Rutas Principales**: Se definen como rutas principales aquellas que conectan dos o más nodos principales. Estas rutas están típicamente bien construidas y sirven como arterias principales de conectividad dentro del área de estudio, facilitando un movimiento y comunicación significativos.

- **Rutas Secundarias**: Las rutas secundarias son aquellas que se originan de una ruta principal y se extienden para conectar con otros nodos secundarios. Estas rutas juegan un papel crucial en la red al proporcionar acceso a áreas no directamente conectadas, mejorando así la conectividad y accesibilidad general de estas regiones.

- **Caminos o Senderos**: Los caminos o senderos se identifican como rutas accidentadas o pistas desgastadas, generalmente formadas por el uso repetido en lugar de una construcción formal. Estos caminos suelen conectar nodos secundarios y se caracterizan por su temporalidad.

Es importante señalar que la clasificación de estas rutas constituye una adaptación a partir de los principios establecidos por el *Directorate-General for Mobility and Transport*, desarrollados en el marco de la Unión Europea (https://road-safety.transport.ec.europa.eu/index_en). Con este enfoque, se ha pretendido proporcionar un marco base partiendo de estándares y criterios generalmente reconocidos que, a su vez, permitiesen analizar y comprender cómo se interconectan y distribuyen estas rutas históricas a lo largo de estas regiones. En consecuencia, esta clasificación tipológica se fundamenta en una aproximación multiescalar, pero también diacrónica, al considerar rutas a diversas escalas espaciales y temporales. Este enfoque sistemático para la clasificación y evaluación de estas estructuras históricas, basado en categorías y criterios bien definidos, garantiza que los resultados del estudio sean accesibles y comprensibles para otros investigadores/as o proyectos de investigación.

Niveles de conocimiento

Siguiendo el enfoque utilizado para las escalas de validación en la localización y contextualización de los sitios arqueológicos, se desarrolló también una escala específica para evaluar el nivel de conocimiento previo asociado a cada ruta documentada. El propósito era establecer mecanismos para manejar y comunicar las incertidumbres inherentes, en este caso, basadas principalmente en datos arqueológicos y en información geográfica relacionada con estas estructuras de movilidad. Además, se buscaba proporcionar un marco sistemático que permitiera cuantificar y categorizar los diversos tipos de fuentes y niveles de información disponibles. Para facilitar la gestión y el análisis, a cada categoría se le asignó también un código numérico identificativo (Tabla 3.9a).

De modo que cada registro fue clasificado en base a las categorías descritas en la Tabla 3.9b. En ella se observan tres niveles en función de la probabilidad que confirma el trazado y uso de cada ruta. (i) El primer nivel (*Demonstrable*) se refiere a rutas cuya existencia y características están documentadas y, por consiguiente, se consideran probadas tanto a través de datos arqueológicos recogidos en campo como de factores geográficos claramente identificables. (ii) El segundo nivel (*Probable*) se aplica a rutas con una alta probabilidad basada principalmente en factores geográficos. Aunque no cuentan con la misma certeza que otorga la validación en campo, estas rutas presentan una coherencia significativa con los patrones geográficos y la información histórica disponible. (iii) El tercer y último nivel (*Conjectured*) se refiere a rutas cuya existencia se fundamenta en indicios y supuestos derivados de datos parciales e información incompleta, llevando a una probabilidad media o baja en cuanto a la hipótesis de su trazado y uso.

De esta forma, la implementación de mecanismos para una evaluación rigurosa y estructurada del conocimiento actual sobre estas estructuras de movilidad históricas no solo facilita el aprendizaje a partir de dicho conocimiento, sino que también fomenta una evaluación crítica de los datos y fuentes consultadas. A pesar de los posibles sesgos o limitaciones en la información disponible, el acompañamiento de estos datos con descripciones y metadatos detallados asegura la transparencia y mejora la confiabilidad. Esto garantiza que otros investigadores/as puedan evaluar tanto las limitaciones como las fortalezas de los resultados obtenidos y de las conclusiones extraídas a partir de ellos.

Tabla 3.9a. Ejemplo de ruta arqueológica junto con las variables *Knowledge* y *Cod_Know*.

VARIABLE	EXAMPLE
ID	PE_NET0203
Zone	1
Name	Unknown
Start_point	Gortyn
End_point	Matala
Length	22,3
Type	Main route
Cod_type	3
Knowledge	Demonstrable
Cod_know	3
Aegean_chr	Roman?, Late Roman?
Egypt_chr	Roman?, Late Roman?
Description	Digitization based on satellite imagery, cartographic, and survey data (19th - 20th century)
Biblio_ref	First GSGS Army/AIR Edition, 1943 AMS-1, 1944; AMS-2, 1947, Khania, Sheet G-19, Iraklion, Sheet G-20. [Tiff]. 1:250,000; D. Survey, War Office and Air Ministry, 1959, Khania, Sheet 424-B; Iraklion, [Tiff]. 1:500,000

Tabla 3.9b. Metadatos que detallan la escala de validación, mostrando la correlación entre el nivel de conocimiento basado en las fuentes y un código asociado a cada categoría.

KNOWLEDGE		
Level of knowledge	**Code** (numeric value)	**Description**
Demonstrable	3	Demonstrable [Based on field archaeological data and geographical factors]
Probable	2	High probability [Based on geographical factors]
Conjectured	1	Medium probability [Based on incomplete information]

3.3 MÉTODOS & TÉCNICAS DE PROSPECCIÓN AÉREA REMOTA

En esta sección, se describen el conjunto de métodos y técnicas que se han desplegado para identificar, caracterizar y contextualizar elementos arqueológicos a lo largo de las diversas topografías estudiadas. Para lograrlo, se diseñó un protocolo que técnicamente incorpora varias fases (Rayne *et al.*, 2017; 2020) y, analíticamente, permite la integración de grandes volúmenes de datos de distinta naturaleza (Wilson, 2021; Andreou *et al.*, 2022). Este enfoque se fundamenta principalmente en el mapeo aéreo mediante fotointerpretación, el cual involucra el análisis exhaustivo a partir de imágenes aéreas y satélite para garantizar la accesibilidad y cobertura completa de la totalidad de territorios que abarcan el área de estudio. Esto ha sido fundamental tanto para determinar la presencia y distribución espacial de los sitios arqueológicos como para entender su relación con el entorno natural y cultural, proporcionando así una perspectiva holística del paisaje biocultural de estas regiones. En el contexto de este estudio, estos procedimientos y criterios se han implementado de forma secuencial mediante las etapas descritas a continuación.

3.3.1 Pre-procesamiento de datos

Esta fase inicial abarcó el tratamiento, procesamiento y transformación de los distintos tipos de datos recopilados a partir de diversas fuentes, adaptándolos a un formato adecuado para su posterior análisis e interpretación. La conversión de los datos a formatos compatibles, estandarizados y normalizados resultó esencial para poder trabajar en un entorno unificado (ArcGIS v.10.5). Para llevar a cabo estos procedimientos, se armonizaron todos los datos, incluidos mapas topográficos, fotografías e imágenes aéreas, así como representaciones gráficas (p. ej., planos y planimetrías) publicadas que mostraban la disposición de estructuras o elementos arqueológicos de superficie documentados en trabajos de campo realizados por otros proyectos de investigación. Todos estos datos fueron normalizados de forma unificada bajo el formato TIFF (*Tagged Image File Format*) con compresión LZW (*Lempel-Ziv-Welch*), utilizando un software especializado de procesamiento de imágenes (Adobe Photoshop v.23.0). La elección del formato TIFF se fundamenta en su capacidad para visualizar datos analógicos digitalizados, como imágenes ráster, sin pérdida de resolución. Además, este formato permite almacenar diversas capas de información dentro de un único archivo, lo que resulta especialmente útil en aplicaciones avanzadas de teledetección. Por su parte, la compresión LZW reduce significativamente el tamaño de los archivos sin comprometer la calidad ni la información contenida en ellos. Este aspecto es crucial para disminuir el coste computacional durante el proceso de manipulación, permitiendo una gestión más eficiente de grandes volúmenes de datos en un entorno SIG (Olaya, 2016).

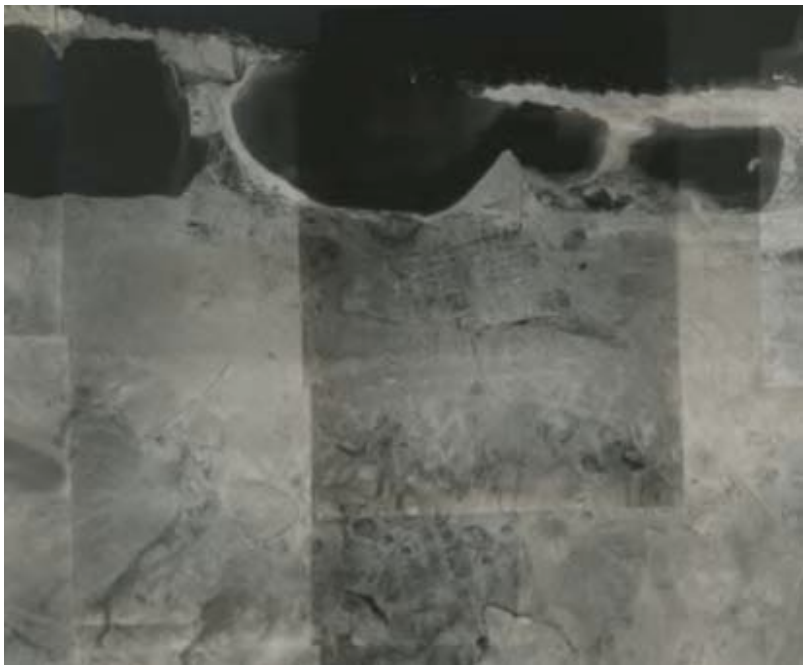


Figura 3.6. Ortomosaico creado a partir de la unión de varias fotografías aéreas tomadas por la *Royal Air Force* (RAF) en 1938, cubriendo la zona de Marsa Matruh (noroeste de Egipto) (© UCL *Institute of Archaeology*).

Durante esta fase de trabajo, se integraron una serie de procedimientos adicionales que resultaron cruciales para garantizar la precisión de la investigación. Estos incluyeron la aplicación de técnicas específicas de filtrado y optimización de las imágenes, como ajustes en la calidad y claridad, corrección y eliminación de ruido, así como la combinación y fusión de imágenes capturadas para crear mosaicos continuos (Figura 3.6). Estos procedimientos fueron esenciales para obtener una representación precisa y completa de las regiones estudiadas, evitando imprecisiones y discontinuidades que pudieran interferir en el análisis. Además, se llevaron a cabo rectificaciones geométricas con el propósito de corregir posibles distorsiones (véase Cap. III, 3.3.3 Métodos de georreferenciación). Estas distorsiones pueden ser causadas por la topografía del terreno o por factores específicos, como las características del sensor o la inclinación de la plataforma utilizada para la adquisición de las imágenes.

3.3.2 Aplicaciones técnicas SIG

Los SIG no solo facilitan el trabajo en un entorno unificado, sino que también permiten la aplicación de herramientas analíticas avanzadas para evaluar e interpretar exhaustivamente aspectos contextuales de tipo geográfico y ambiental en torno a los sitios arqueológicos. Un ejemplo representativo es el uso de herramientas específicas de hidrología y topografía que nos permiten una evaluación detallada de las características geomorfológicas de estas regiones. Este enfoque se basa principalmente en el uso de distintos modelos digitales de elevación (EU DEM 25 m para Creta y SRTM de 30 m de resolución para Marmárica), junto con datos de teledetección para cartografiar masas de agua, examinar patrones de drenaje, analizar las acumulaciones de cuencas hidrográficas y evaluar elementos topográficos del terreno (Figura 3.7a y 3.7b, izquierda).

Estos procedimientos han sido decisivos para comprender aspectos clave como las variaciones en la elevación y pendiente que afectan a las condiciones climáticas regionales, características hidrológicas, patrones de erosión, usos del suelo y la distribución de los hábitats —ofreciendo también la posibilidad de supervisar futuros cambios en todos estos elementos. De este modo, se han definido diversas unidades biogeográficas caracterizadas por entornos únicos que abarcan una amplia gama de paisajes, desde áreas costeras mediterráneas hasta mesetas y márgenes desérticos influenciados por el Sáhara (Figura 3.7a y 3.7b, derecha). Estas zonas determinan los recursos naturales disponibles y las adaptaciones culturales necesarias para su aprovechamiento. Así, estos procedimientos nos han permitido identificar diversos nichos ecológicos en función de características bioclimáticas que definen ecosistemas y su capacidad para sostener diversas formas de vida.

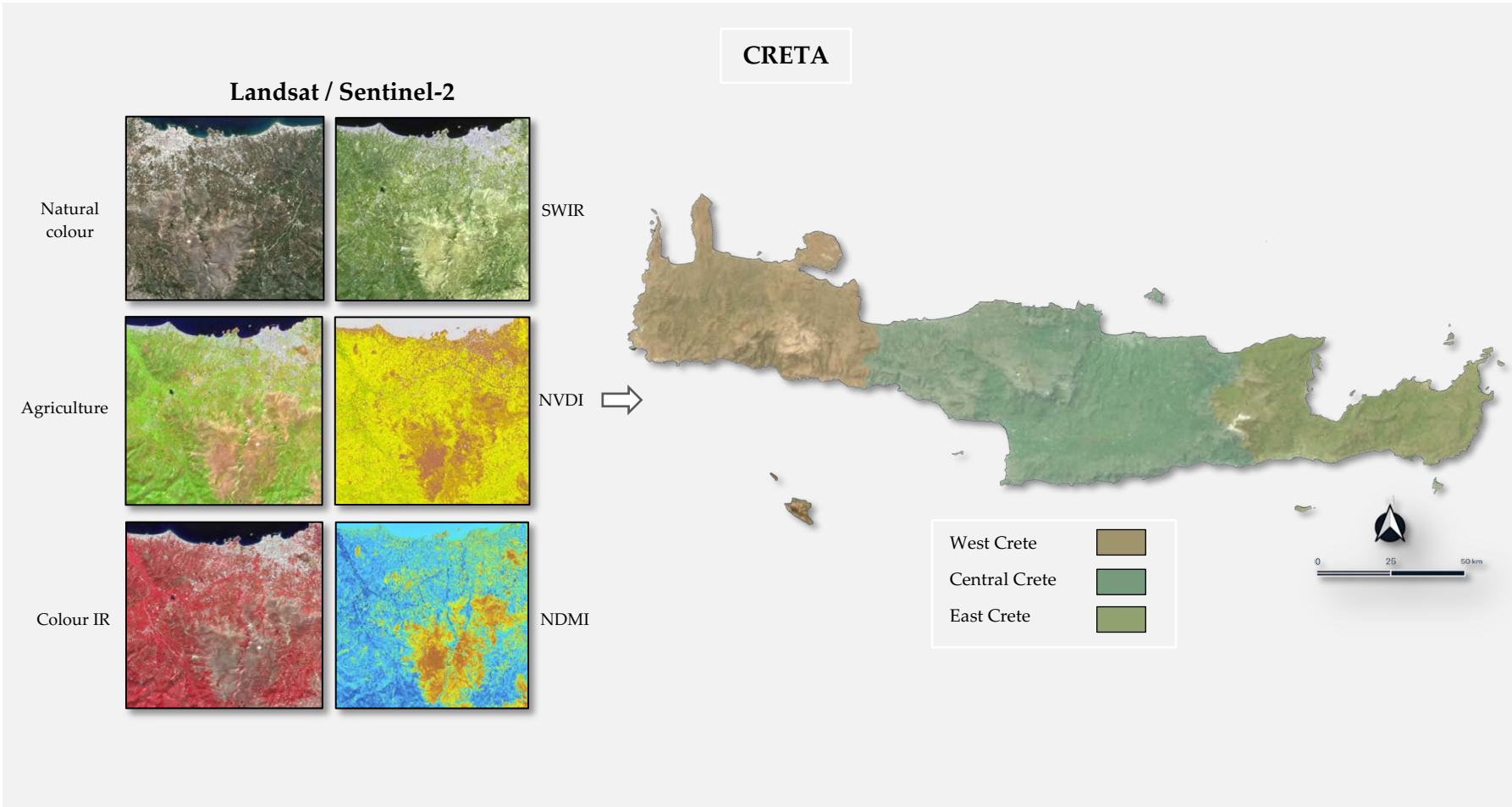


Figura 3.7a. Representación de las diversas unidades biogeográficas que componen la isla de Creta (Grecia), definidas a partir de imágenes satélite y datos de teledetección. Esta evaluación ha permitido agrupar los registros arqueológicos en torno a tres unidades regionales principales: Creta occidental (Khania), Creta central (Rethymno y Heraklion) y Creta oriental (Lasithi).

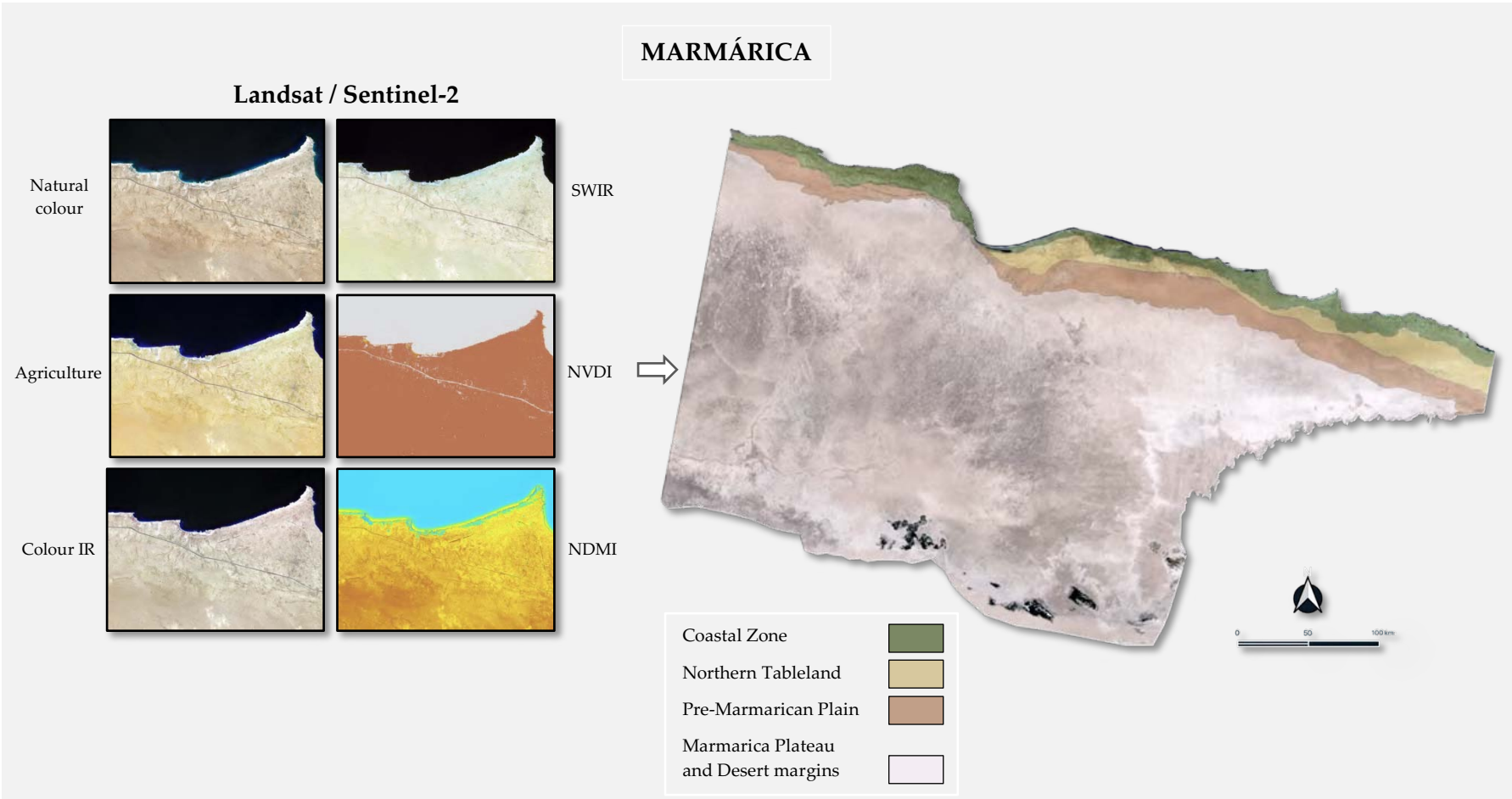


Figura 3.7b. Las diversas zonas ecológicas que componen la región de Marmárica (NE-Libia / NO-Egipto) definidas a partir de imágenes satélite y datos de teledetección. Estas incluyen la zona costera (*Coastal Zone*), la meseta septentrional (*Northern Tableland*), la llanura Premarmárica (*Pre-Marmarican Plain*) y la meseta de Marmárica (*Marmarica Plateau*), junto a los márgenes del desierto de Libia (Sáhara en su parte nororiental).

3.3.3 Métodos de georreferenciación

En el ámbito de la investigación arqueológica, al explorar los datos obtenidos a través de distintos tipos de fuentes, es frecuente que estos no estén asociados a ningún sistema de referencia espacial (SRE). Esta situación es especialmente común cuando se emplea cartografía y fotografías aéreas históricas que, incluso si tienen un sistema de referencia asociado, presentan geometrías que suelen diferir de las coordenadas correspondientes a la zona geográfica del estudio. Por esta razón, un paso fundamental consiste en la alineación de todos estos datos con ubicaciones geográficas específicas basadas en posiciones geoespaciales conocidas. Esta operación, conocida como proceso de georreferenciación, requiere además un análisis preliminar exhaustivo de la topografía mediante imágenes aéreas. Al examinar estas imágenes desde una perspectiva cenital, es posible localizar y seleccionar puntos topográficos de referencia, esenciales para el proceso de georreferenciación, ya que proporcionan anclajes precisos para ajustar las coordenadas de los datos.

En el contexto de esta investigación, los diversos tipos de datos recopilados —i.e., mapas topográficos, planimetrías, fotografías aéreas, imágenes satelitales, etc.—, en muchos casos, no contaban con un sistema de referencia asociado o, en los pocos casos en que lo tenían, no estaban correctamente alineados con las coordenadas del proyecto (WGS 84 / UTM zona 35N [EPSG:32635]). Para solucionar esta limitación, se reproyectaron los datos procesados mediante la toma de puntos de control del terreno (GCPs, por sus siglas en inglés), realizando las rectificaciones geométricas necesarias basadas en los hitos previamente identificados. Este procedimiento aseguró que los distintos tipos de datos e imágenes se alinearan correctamente con las

coordenadas geográficas adecuadas (Figura 3.8), permitiendo su integración en un entorno de trabajo unificado. Asimismo, este proceso contribuyó a conocer y delimitar de forma más precisa los límites del área de estudio, mejorando la exactitud de las regiones a analizar.



Figura 3.8. La Bahía de Sollum (noroeste de Egipto) marca el límite septentrional entre Marmárica occidental y oriental. (A) Ejemplo de mapa topográfico georreferenciado durante este estudio (P502, Hoja NH 35-1, Bardia © *The University of Texas at Austin*). (B) Imagen satelital que muestra la misma zona (mapa base © *Microsoft*).

En cuanto al número de puntos de control seleccionados (normalmente de 3 a 10) y el método de transformación elegido (primer orden, ajuste, spline, etc.), estos fueron cuidadosamente seleccionados en función de la especificidad de cada elemento a georreferenciar. Este proceso es crucial, ya que se han procesado una gran cantidad de datos de distinta naturaleza y periodos históricos. A continuación, se describen algunos de los principales métodos de transformación empleados, el funcionamiento y el número de puntos de control del terreno necesarios para cada uno de ellos, así como algunas de las principales ventajas e inconvenientes al aplicarlos. Estos aspectos se presentan de manera resumida en la siguiente tabla (Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Principales métodos de georreferenciación utilizados en el contexto de esta investigación.

Tipo de Transformación	Descripción	Método	CGPs	Ventajas	Inconvenientes
Polinomial de Primer Orden (First-Order Polynomial Transformation)	Similar a la transformación afín, incluye traslación, rotación y escalado	Usa ecuaciones polinómicas de primer orden	Mínimo 3	Simplicidad y facilidad de uso	Más de tres vínculos puede introducir errores
Polinomial de Segundo Orden (Second-Order Polynomial Transformation)	Permite curvaturas y distorsiones cuadráticas	Usa ecuaciones polinómicas de segundo orden	Al menos 6	Mejora la capacidad de ajuste para distorsiones más complejas	Requiere más puntos de control
Polinomial de Tercer Orden (Third-Order Polynomial Transformation)	Permite ajustes cúbicos y distorsiones más complejas	Usa ecuaciones polinómicas de tercer orden	Al menos 10	Aún más flexible para distorsiones complejas	Requiere aún más puntos de control
Ajuste (Adjust Transformation)	Realiza ajustes complejos, incluyendo cambios no lineales	Usa interpolación local y global basada en los GCPs	Variable	Mejor para imágenes con distorsiones complejas	Requiere un número suficiente de GCPs bien distribuidos
Proyectiva (Projective Transformation)	Transformación proyectiva que maneja distorsiones debidas a la perspectiva	Usa ecuaciones basadas en la proyección	Al menos 4	Ideal para imágenes con distorsiones de perspectiva	Menos precisa si no hay suficientes puntos de control bien distribuidos
Spline (Spline Transformation)	Utiliza una interpolación de spline que ajusta localmente en función de los GCPs	Se basa en una función spline, transformando los puntos de control de origen a destino	Al menos 10	Muy precisa para la exactitud local	Puede producir distorsiones en áreas alejadas de los GCPs. No preserva formas lineales.

3.3.4 Mapeo aéreo mediante fotointerpretación

Finalmente, en la última fase de esta etapa de la investigación, el enfoque se centró en el despliegue del mapeo aéreo mediante fotointerpretación. Este método se basa en el uso de fotografías e imágenes aéreas con el objetivo de detectar indicios de estructuras arqueológicas a través de diferencias visuales en el terreno. Para maximizar la eficacia y precisión del análisis, la totalidad del área de estudio se subdividió en cuadrículas de 10 × 10 km, incorporando la superposición de numerosas capas de datos e información —como mapas topográficos, planos y fotografías (Figura 3.9). Este marco fue esencial para identificar diferencias sutiles en la vegetación, el color del suelo y otros elementos de la superficie que podrían indicar la presencia de evidencia arqueológica.

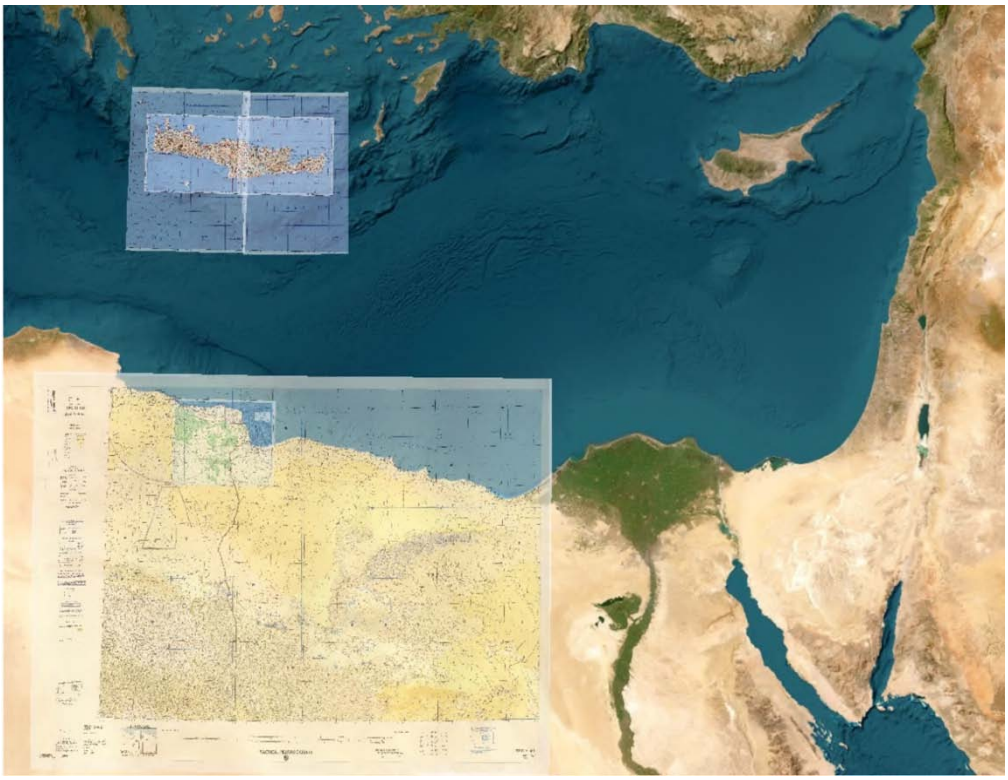


Figura 3.9. Mapa que muestra las regiones mencionadas en este texto con diferentes capas de datos e información cartográfica georreferenciadas (mapa base © *ESRI*).

Tal y como se destacó en secciones anteriores, una vez identificado cada sitio de interés, este se registraba y representaba mediante un vector tipo punto, sin considerar su extensión o tamaño original. Esta geometría simplificada permitía una aplicación coherente a todos los sitios, independientemente de la información disponible sobre ellos (Figura 3.10, izquierda). Posteriormente, toda la información contextual asociada era registrada de forma sistemática en los modelos de datos. Además, esta metodología facilitó la identificación y el registro de posibles estructuras asociadas a los principales sitios arqueológicos (Figura 3.10, derecha). En última instancia, el proceso de mapeo no solo permitió analizar arqueológicamente la zona de estudio con gran detalle, sino que también posibilitó la evaluación e interpretación de una gran diversidad de paisajes, revelando la compleja interacción continua entre factores humanos y no humanos en estos lugares.

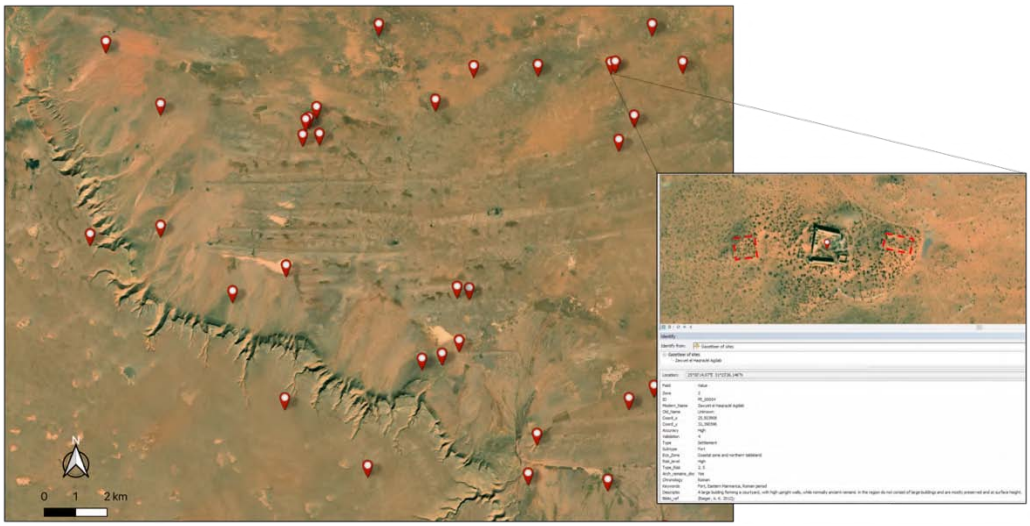


Figura 3.10. La figura presenta, a la izquierda, una muestra de los sitios identificados y registrados en una zona específica de Marmárica, ofreciendo una visión general de la distribución espacial de estos sitios. A la derecha, se muestra en detalle el caso específico del fuerte de época romana conocido como Zawiyet el Agdab (PE_00054) (NO-Egipto), incluyendo toda su información contextual asociada e integrada en el modelo de datos (mapa base: © *ESRI*).

En cuanto a la identificación de las rutas históricas, se siguió el mismo proceso exhaustivo que combinaba la verificación cruzada de diversas fuentes y el

reconocimiento aéreo mediante fotointerpretación. Este enfoque permitió detectar y documentar con gran precisión la extensión y el recorrido de estas estructuras de movilidad. En este sentido, el mapeo se centró en identificar elementos lineales como rutas, senderos y caminos tradicionales, a partir de variaciones en los patrones de vegetación, cambios en el color del suelo y otras anomalías superficiales que pudieran indicar la presencia de estas antiguas estructuras de movilidad (Figura 3.11).



Figura 3.11. Representación de las estructuras de movilidad históricas de Marmárica y cómo se han documentado de acuerdo a su tipología a partir de diversas fuentes (Iraklion, Hoja 425-A) (mapa base: © *Microsoft*).

3.4 ESTUDIOS DE CASO

Al concluir este proyecto de tesis doctoral financiado en julio de 2024, se habían registrado un total de 5.017 sitios arqueológicos que corresponden a territorios del Egeo (Creta) y el noreste del África mediterránea (Marmárica), abarcando una cronología que se extiende desde el Bronce Final hasta época romana. Por tanto, se evaluaron más de 5.000 sitios, incluidos aproximadamente 200 documentados a partir de fuentes que no eran visibles en las imágenes o que ya habían desaparecido por completo. En particular, las evaluaciones se centraron en las regiones de Creta (Grecia), donde se identificaron 1.665 sitios arqueológicos; Marmárica oriental (noroeste de Egipto), donde se identificaron 2.717; seguida de Marmárica occidental (noreste de Libia), donde se registraron finalmente otros 635. Estas evaluaciones subrayan la importancia de estas regiones, ricas en patrimonio histórico y cultural, caracterizadas por la presencia de una amplia variedad de asentamientos, lugares de enterramiento, zonas productivas y lugares históricos de captación de recursos.

En cuanto a las rutas identificadas y registradas, se digitalizaron un total de 623 tramos entre las regiones de Creta (426) y Marmárica (197), que corresponden aproximadamente a unos 16.000 km. Esta labor ofrece una perspectiva única y detallada de cómo se estructuran y conectan estos lugares, revelando patrones de movilidad y accesibilidad a través de los diversos paisajes que los componen. El registro y clasificación sistemática de las rutas históricas destaca aún más la riqueza patrimonial de estas regiones, aportando nuevos conocimientos sobre modelos de conectividad históricos tanto en el ámbito mediterráneo como del norte de África.

3.4.1 Creta (Grecia)

En el caso específico de Creta, el proceso de mapeo aéreo se llevó a cabo mediante un enfoque integral que permitió analizar de manera exhaustiva el paisaje arqueológico a lo largo de esta región. Este procedimiento requirió la consideración de diversos factores que podían interferir de manera significativa en su aplicación. Entre los principales condicionantes se encuentran la accidentada orografía, la presencia de zonas con alta densidad de vegetación y áreas con un gran desarrollo urbano. Para afrontar este desafío, se emplearon combinaciones de bandas de imágenes multiespectrales de *Landsat* y *Sentinel-2*, basándose en tres principios fundamentales de teledetección: (i) las tasas de crecimiento de la vegetación se ven alteradas por los restos arqueológicos subyacentes; (ii) estos efectos suelen variar a lo largo del ciclo estacional, lo que hace crucial considerar imágenes capturadas en distintos períodos estacionales; y (iii) la importancia de utilizar distintas series temporales de imágenes para obtener una visión dinámica del paisaje, observando los cambios que se producen en él a lo largo del tiempo.

El aprovechamiento de las frecuentes tasas de retorno de los satélites *Landsat* y *Sentinel-2*, junto con imágenes de alta resolución proporcionadas por las plataformas de *Google, Microsoft* y *ESRI*, permitió detectar diversos tipos de anomalías que fueron identificadas e interpretadas como indicios de posibles sitios arqueológicos. Adicionalmente, la integración de imágenes aéreas históricas, como las proporcionadas por el gobierno griego, ofreció una perspectiva temporal adicional (Figura 3.12). Para contextualizar estos sitios, se incorporaron también numerosas capas de datos e información, destacando especialmente los registros arqueológicos de prospección publicados en el marco de diversos proyectos de investigación (Figura 3.13).

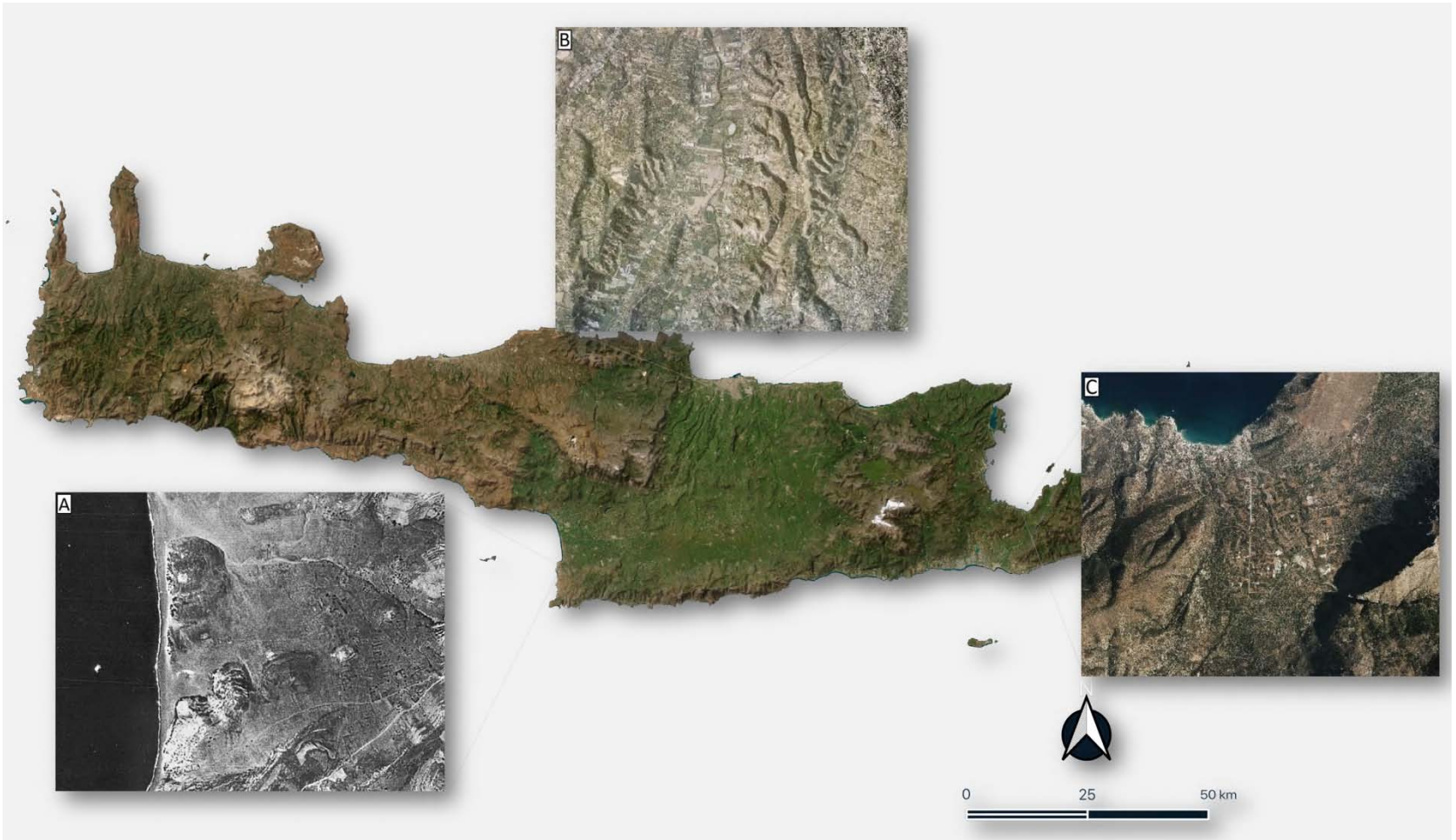


Figura 3.12. Representación general de la isla de Creta con ejemplos de imágenes aéreas y satélite de distintas series temporales obtenidas a partir del servicio de mapas web (WMS) del *Ελληνικό Κτηματολόγιο*. (A) Costa de Mesará (1945-1960); (B) Periferia de la ciudad de Heraklion (2007-2009); (C) Bahía de Mirabello (2015-2016) (mapa base: © *Microsoft*).



Figura 3.13. Principales áreas de investigación arqueológica y los proyectos de prospección que han realizado estudios de campo en la isla. Esta representación ofrece una perspectiva del alcance y la distribución de los esfuerzos de investigación durante las últimas décadas a lo largo de esta región (mapa base: © *Microsoft*).

En relación con este último aspecto, cabe destacar nuestra participación como parte del equipo de excavación y prospección en el proyecto internacional del *Sissi Archaeological Project* (*École Belge d'Athènes / Université Catholique de Louvain*) durante los meses de junio a agosto de la campaña de 2019. Esta colaboración, llevada a cabo en la desembocadura del río Selinari (Sisi, Creta), nos permitió acceder de primera mano a registros y materiales de campo, lo cual fue fundamental para conocer las fases de ocupación y actividad humana en este territorio de la costa norte de Creta (Figura 3.14). Asimismo, durante estos meses se realizaron recorridos exhaustivos a lo largo de las diversas regiones que conforman la isla, documentando de primera mano y de forma detallada la diversidad de paisajes que la componen, enriqueciendo con ello nuestra comprensión del contexto geográfico y ambiental del patrimonio arqueológico de Creta (Figuras 3.15 a 3.17).



Figura 3.14. Trabajos de prospección realizados en torno a la desembocadura del río Selinari (Creta, Grecia) (Fotografía del autor).



Figura 3.15. Vista general del territorio investigado, que abarca todo el valle hasta la colina de Kephali (a la derecha de la imagen) y sus alrededores (este de Creta) (Fotografía del autor).



Figura 3.16. Vista panorámica de la fértil llanura de Mesará, con las montañas Asterousia al fondo, situada en el sur de la isla de Creta (Creta central) (Fotografía del autor).



Figura 3.17. Panorámica de la bahía de Balos en la región de Khania (oeste de Creta), que representa el punto más occidental de la isla, accesible únicamente desde Kissamos (Fotografía del autor).

Una vez completado el mapeo arqueológico, en el caso de Creta se identificaron, tras aproximadamente un año y medio de trabajo, un total de 1.665 sitios arqueológicos que abarcan desde el Bronce Final hasta el período de ocupación romana (Figuras 3.18 a 3.21). Este número refleja la significativa densidad y diversidad arqueológica de la isla, con una distribución que abarca sus cuatro unidades regionales: Khania (oeste de Creta) con un total de 347 sitios, Rethymno y Heraklion (Creta central) con 119 y 663 sitios respectivamente, y finalmente Lasithi (este de Creta) con 535 sitios documentados. Esta división regional permitió realizar un análisis detallado y exhaustivo de cada área, facilitando la comparación e identificación de patrones y dinámicas de ocupación en estos lugares.

De manera similar, la clasificación sistemática realizada sobre cada registro permitió determinar no solo aspectos relacionados con la densidad y distribución de los sitios, sino también comprender su naturaleza y funcionalidad. En relación con este último aspecto, los sitios arqueológicos documentados incluyen principalmente asentamientos (63,72%), lugares de enterramiento (27,87%) y áreas productivas (8,41%). Estos resultados sobre densidad, distribución, naturaleza y funcionalidad refuerzan la importancia estratégica de Creta como un centro significativo de actividad humana y cultural a lo largo de los diferentes periodos considerados. Además, el análisis de los paisajes que la conforman ha proporcionado una perspectiva única para comprender las complejas dinámicas de esta región a lo largo del tiempo.

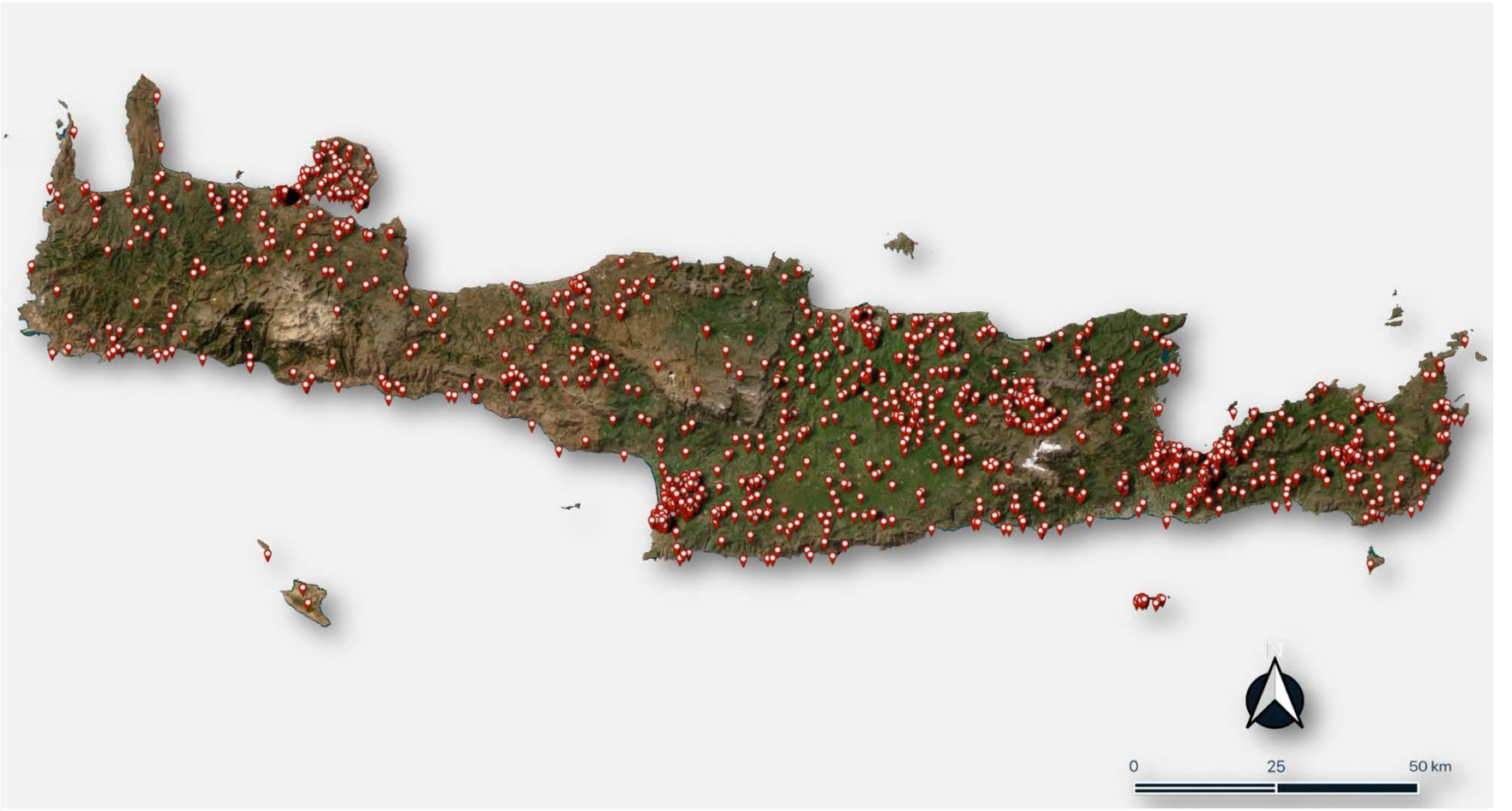


Figura 3.18. Representación de la totalidad de los sitios arqueológicos identificados y registrados en el marco de esta investigación en Creta, abarcando sus diferentes unidades regionales (mapa base: © *Microsoft*).



Figura 3.19. Ejemplos de sitios arqueológicos documentados durante el proceso de mapeo y validados en campo. (*Izquierda*) Phaistos (PE_01754), Heraklion, Creta. (*Derecha*) Kommos (PE_01750), al sur de la isla, frente al Mar de Libia (Fotografías del autor).



Figura 3.20. Ejemplos de sitios arqueológicos documentados durante el proceso de mapeo validados en campo. (*Arriba*) Agia Tríada (PE_01753), Heraclión, Creta. (*Abajo*) Malia (PE_03726), en la costa norte de Creta (Fotografías del autor).

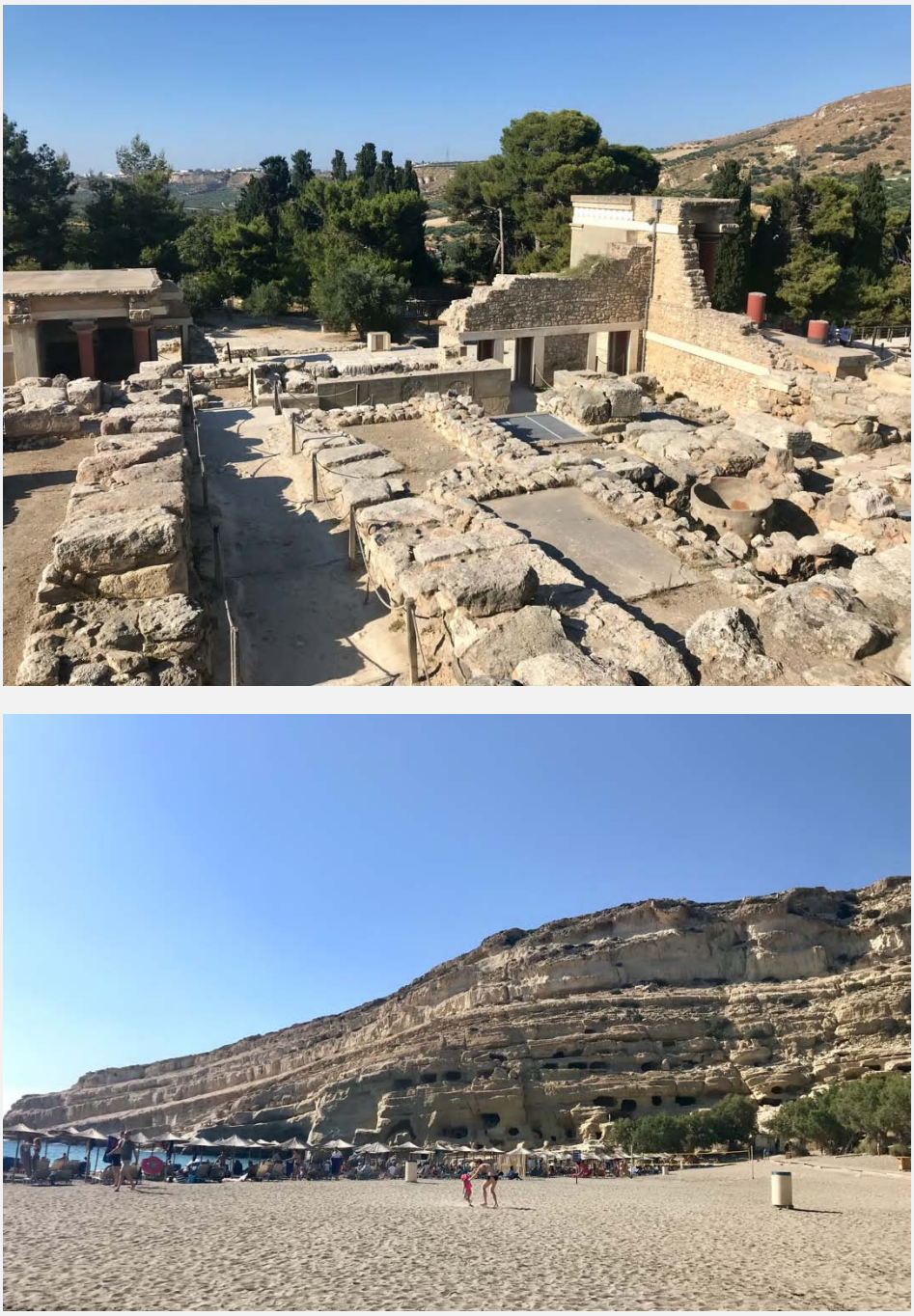


Figura 3.21. Ejemplos de sitios arqueológicos documentados durante el proceso de mapeo y validados en campo. (*Arriba*) El sitio emblemático de Cnossos (PE_03717), en la costa norte de Creta. (*Abajo*) Cuevas del puerto de Matala (PE_01750), en la costa sur de Creta (Fotografías del autor).

Es importante destacar la diversidad de fuentes, recursos y datos consultados, los cuales han sido cruciales para identificar, caracterizar y evaluar los sitios del patrimonio arqueológico y cultural cretense. No obstante, a pesar de que Creta cuenta con una tradición historiográfica extensa, respaldada por numerosos estudios y trabajos publicados que proporcionan datos precisos sobre excavaciones, dataciones, distribución y tipología de los sitios arqueológicos, no hemos estado exentos de lidiar con las numerosas incertidumbres que acompañan a los datos y niveles de información disponibles. Para afrontar esta problemática, tal y como se ha descrito en secciones anteriores, se han desarrollado y aplicado escalas de validación específicas con el objetivo de ayudar a reducir y mitigar su impacto, aunque en última instancia, la forma más efectiva para hacerlo ha sido actuar con transparencia y comunicación.

Como resultado, las siguientes figuras muestran diversos casos de sitios registrados en Creta en función del nivel de precisión en la digitalización y el grado de validación de las fuentes e información utilizadas (Figura 3.22, izquierda). Por otro lado, el segundo gráfico desplegado permite ilustrar los resultados una vez completado el proceso de mapeo arqueológico, mostrando sobre el total de los registros la relación entre precisión y grupos de validación (Figura 3.22, derecha). Los resultados proporcionan una visión clara de cómo la precisión de los datos varía en función de los diferentes niveles de información. Por lo tanto, esta evaluación crítica sobre los propios datos y fuentes utilizadas ha permitido identificar patrones y establecer vías para comunicar las fortalezas y limitaciones de los resultados obtenidos y las interpretaciones que pueden extraerse a partir de ellos. Se trata de una investigación exploratoria y el futuro es plantear estudios de campo para ampliar y validar los datos e información proporcionados.

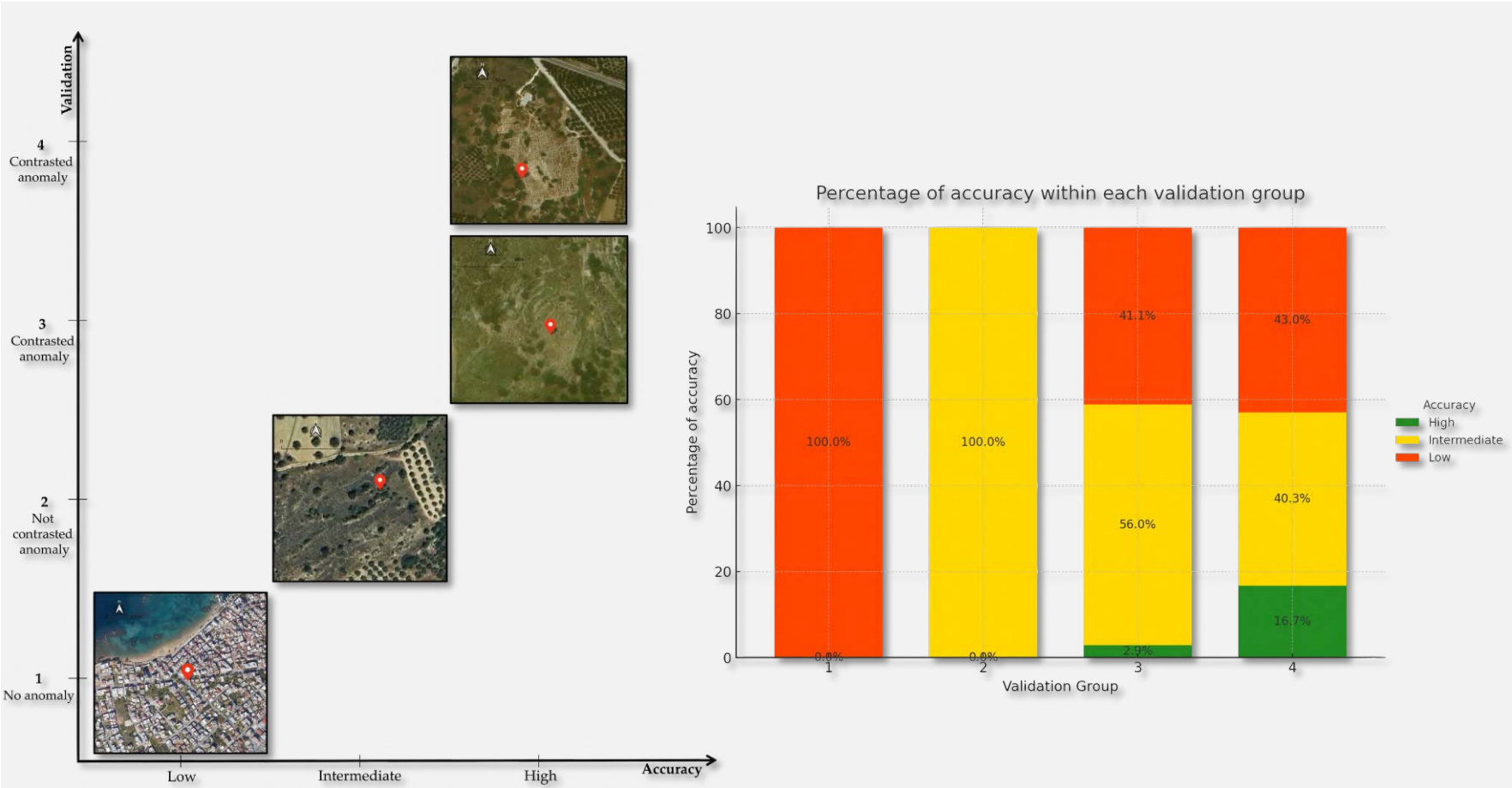


Figura 3.22. A la izquierda, se presentan ejemplos específicos de sitios arqueológicos clasificados según el grado de precisión y validación que ofrecen las fuentes utilizadas. A la derecha, el gráfico proporciona una representación visual de cómo la precisión en la digitalización de los sitios arqueológicos se correlaciona con el nivel de validación de las fuentes. Cabe destacar que, debido a factores como la densa cobertura vegetal y el gran desarrollo urbano y agrícola que presenta el caso específico de Creta, se observa que las tasas de precisión muy altas en la digitalización no son tan comunes.

En cuanto a las rutas documentadas, se identificaron y digitalizaron un total de 426 tramos, que corresponden específicamente a 3.527 km y abarcan la totalidad de la isla (Figuras 3.23 y 3.25). Estos resultados representan un esfuerzo considerable en el registro de este tipo de evidencia, proporcionando una base sólida para comprender la configuración y distribución espacial de las estructuras de movilidad históricas en esta región. Este proceso implicó la recolección y conversión de una gran cantidad de datos a formato digital, ampliando de manera significativa la información disponible previamente. En el contexto de este estudio, registrar las rutas o caminos tradicionales conocidos ha permitido interpretar cómo se movían las personas y los bienes a través de los diversos paisajes que componen la isla, ofreciendo indicadores útiles para entender antiguas dinámicas de movilidad y accesibilidad.



Figura 3.23. Vista de la salida desde el desfiladero de Selinari en Creta, que constituía la principal ruta terrestre que conectaba el centro-norte con el este de la isla (Fotografía del autor).



Figura 3.24. Representación completa de las rutas identificadas y registradas en Creta como parte de la investigación. Estas rutas abarcan diferentes unidades regionales de la isla, proporcionando una visión integral de la red de caminos históricos y su distribución geográfica (mapa base: © *Microsoft*).

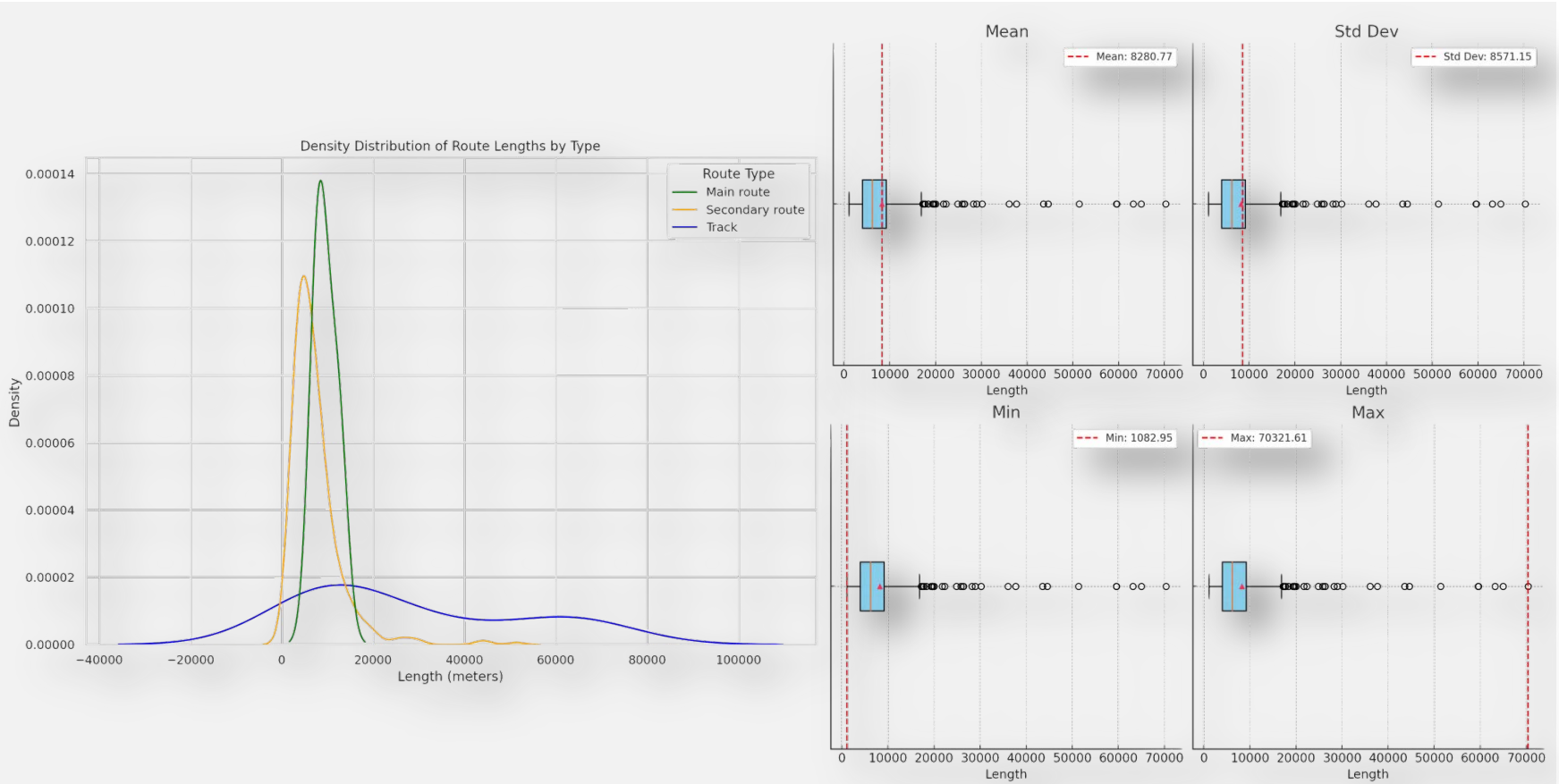


Figura 3.25. (*Izquierda*) Gráfico que muestra la distribución de densidad de las longitudes de las rutas categorizadas según su tipología. las rutas principales (línea verde) tienden a ser más largas y muestran una distribución más amplia. Las rutas secundarias (línea amarilla) tienen una longitud más uniforme, con una distribución más concentrada. Y, finalmente, los caminos, representados por la línea azul, muestran una distribución de longitud más corta y se encuentra entre las rutas principales y las secundarias en términos de variabilidad. (*Derecha*) *Boxplots* que representan los valores de longitud de las rutas escalados. Cada gráfico muestra una medida estadística específica (media, desviación estándar, mínimo y máximo). Los valores atípicos se representan como círculos blancos con borde negro.

Finalmente, la combinación de técnicas avanzadas de teledetección y SIG ha posibilitado la consideración e inclusión de otro tipo factores o condicionantes relacionados con la actividad humana y elementos naturales del entorno que ejercen su influencia sobre el paisaje arqueológico. Como resultado, se ha podido delimitar aspectos geográficos y ambientales específicos, tales como las formas del terreno o variables climáticas como —por ejemplo— la temperatura (Figura 3.26a). Asimismo, hemos podido identificar otras características relacionadas con el entorno natural, como áreas con diversa tipología y densidad de la cobertura vegetal del terreno (Figuras 3.26b). De forma complementaria, también ha sido decisivo definir diferentes características antropogénicas para poder comprender cómo las actividades humanas impactan en el paisaje arqueológico. En relación con este aspecto, algunos de los condicionantes principales considerados han sido la expansión urbana y la intensificación de la agricultura (Figura 3.26c).

En definitiva, estas aproximaciones, que combinan diversas técnicas y tecnologías e integran factores humanos y no humanos, han posibilitado una mejora significativa en la identificación, caracterización y evaluación de los sitios arqueológicos, situándolos dentro de un contexto geográfico y ambiental más amplio, acorde con el marco de investigación planteado. Este enfoque holístico ha demostrado ser eficaz, ya que aborda tanto las limitaciones inherentes a la detección, registro y contextualización de este patrimonio, como la identificación y evaluación de posibles amenazas que podrían tener un impacto en su conservación. De este modo, estos enfoques enfrentan de manera efectiva los desafíos inherentes al estudio del paisaje arqueológico, proporcionando una visión completa y precisa de la historia coevolutiva de estos lugares.

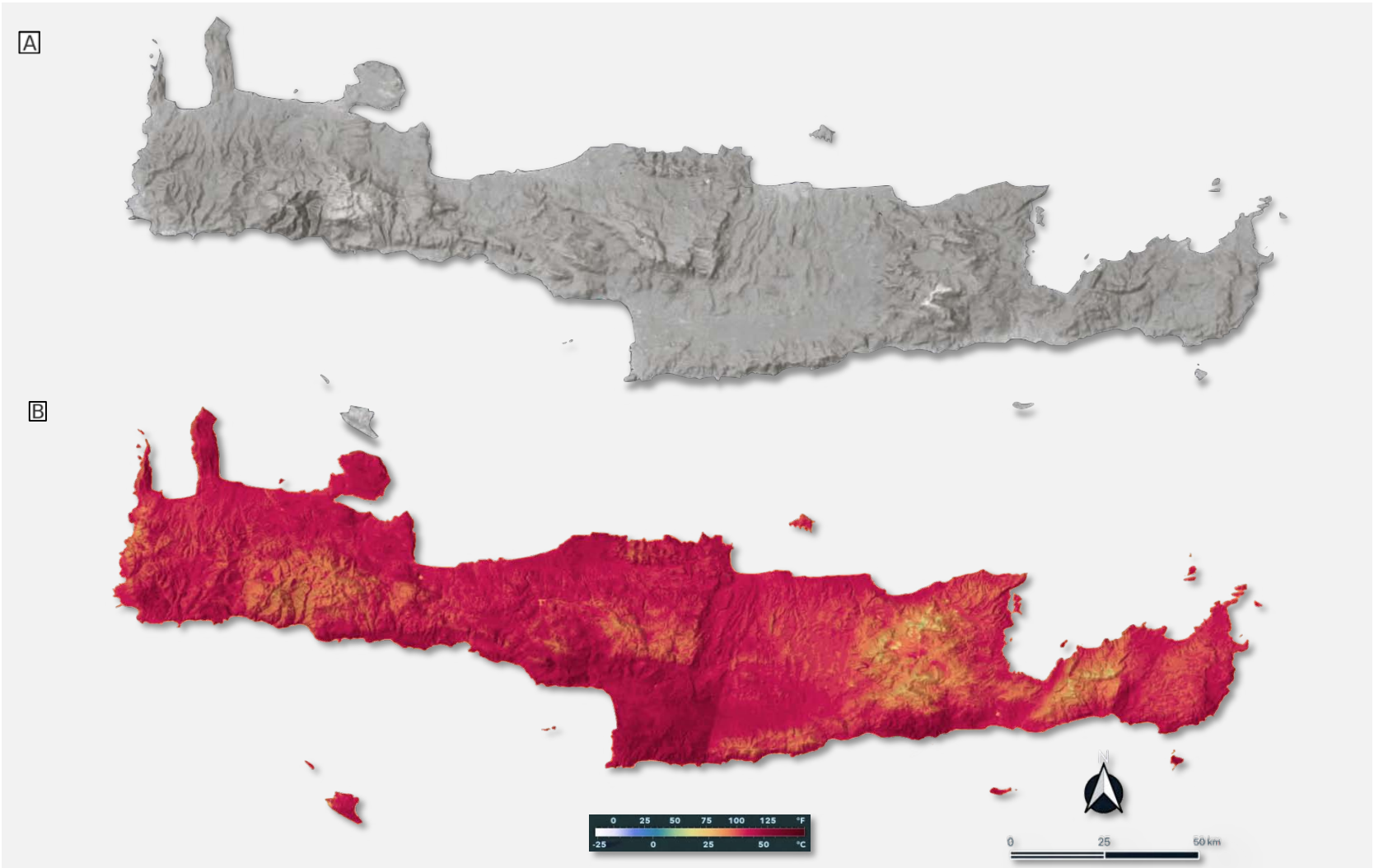


Figura 3.26a. (A) Representación topográfica de la isla de Creta, resaltando las características físicas del terreno. (B) Representación media anual de la temperatura en la isla, mediante un esquema de colores que muestra la variabilidad entre las diferentes zonas que la componen (Fuente: *Sentinel-2*).

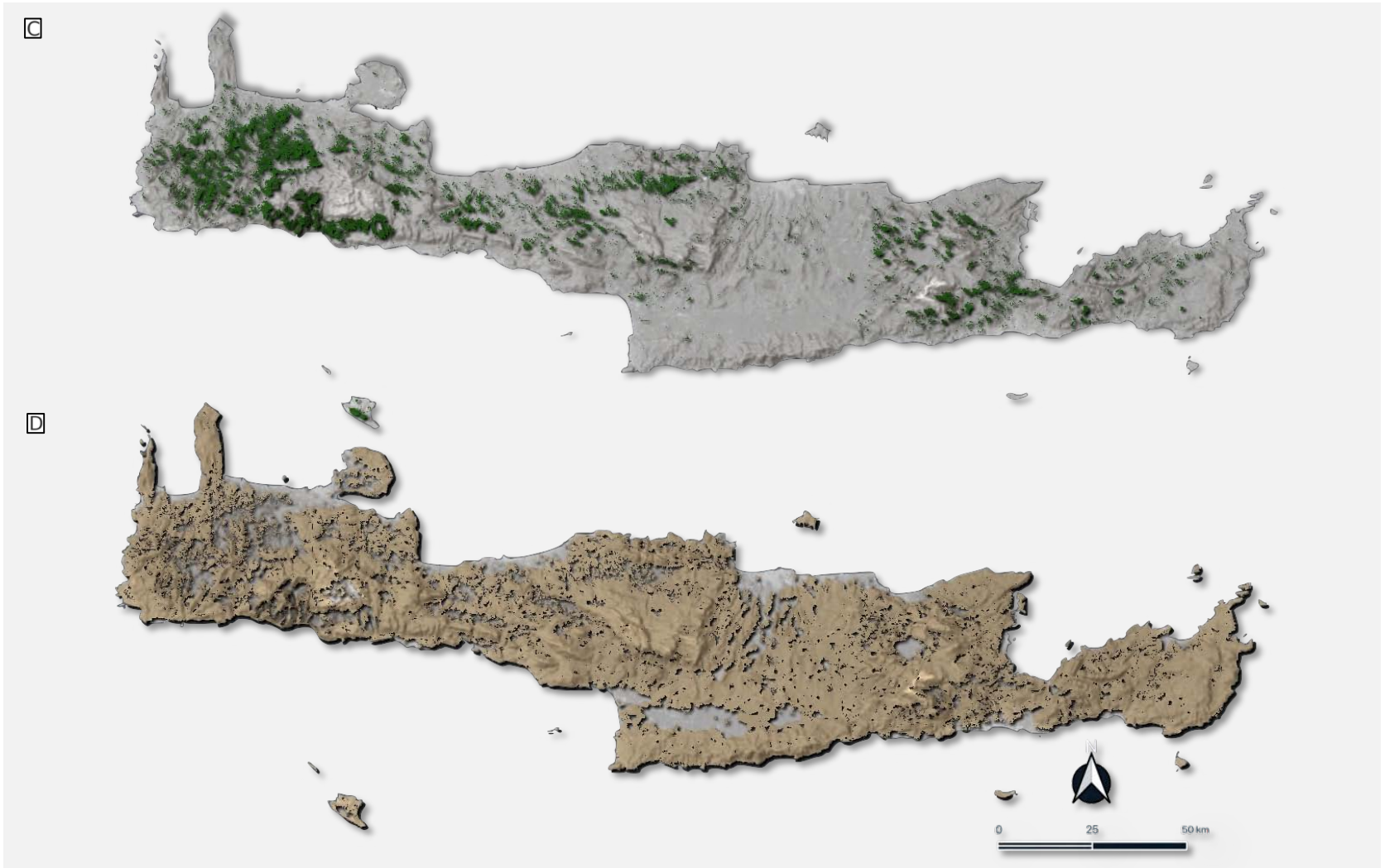


Figure 3.26b. Representación de la cobertura vegetal del terreno de la isla de Creta, proporcionando un análisis de las áreas con alta densidad de vegetación y aquellas con escasa cobertura vegetal. (C) Las zonas verdes representan áreas con alta densidad de vegetación (~15 metros o más). (D) Las zonas marrones muestran áreas cubiertas con poca vegetación, es decir, una mezcla de paisajes que muestran el suelo expuesto o claros con matorrales (Fuente: *Sentinel-2).*

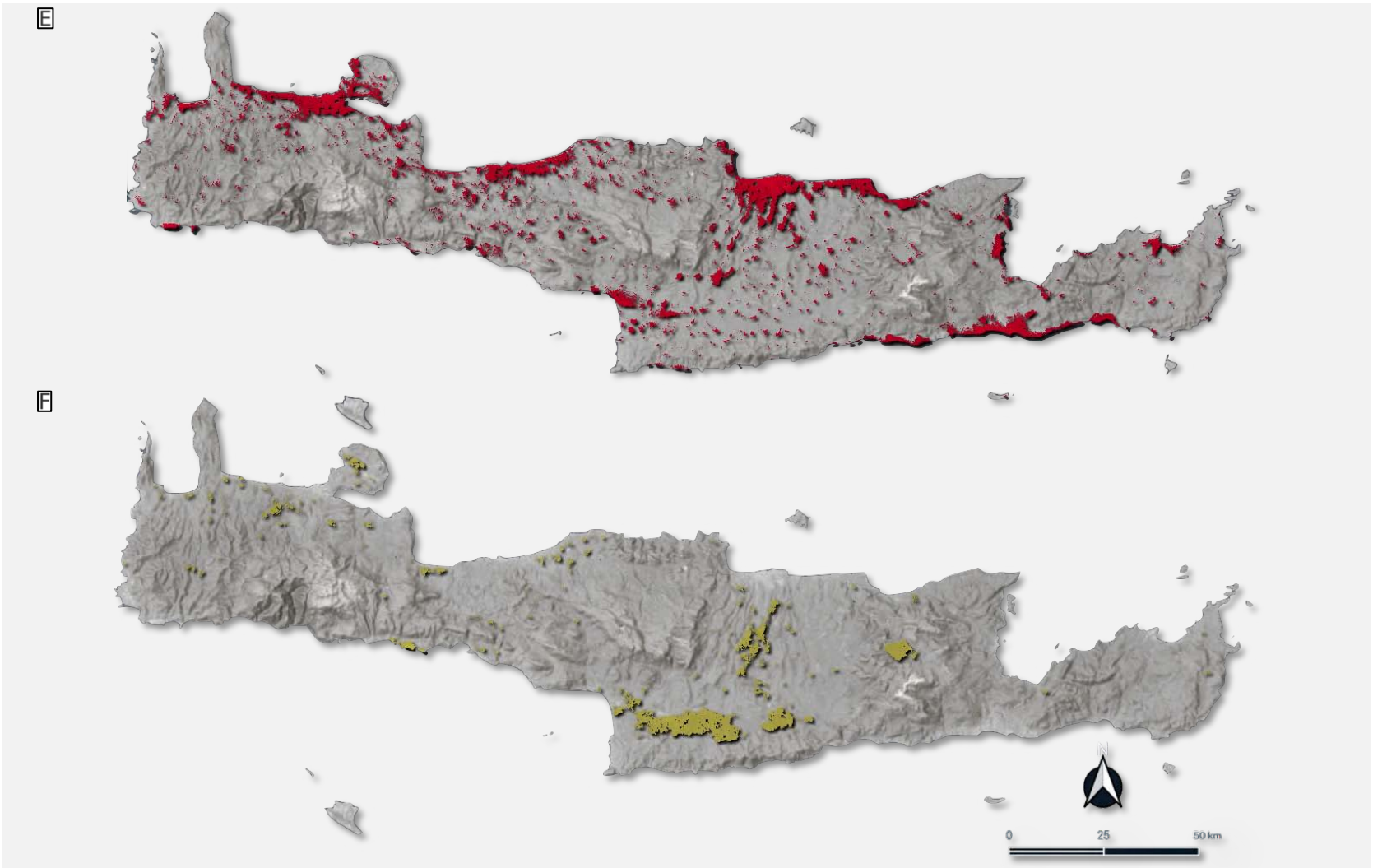


Figure 3.26c. (E) Las zonas rojas representan áreas que han experimentado un desarrollo urbano significativo en Creta. (F) Las zonas verdes muestran áreas cubiertas por grandes extensiones de terrenos agrícolas (Fuente: *Sentinel-2*).

3.4.2 Marmárica (NE-Libia/NO-Egipto)

El patrimonio arqueológico del norte de África está marcado por una trayectoria compleja y dinámica. En estas regiones, predominantemente caracterizadas por paisajes áridos y semiáridos, la disponibilidad de agua y vegetación condiciona la vida y exige conocimientos especializados para la gestión de estos recursos limitados. Estas condiciones obligan a las diversas especies que habitan estos lugares a adaptarse, destacando la importancia de considerar los diversos nichos ecológicos. En este contexto, las características físicas y ambientales de Marmárica generaron unas condiciones específicas a las que los humanos no solo se adaptaron, sino que también modificaron, dejando huellas e impactos que han transformado el paisaje a lo largo del tiempo.

En el diseño del estudio arqueológico de Marmárica, resultó fundamental considerar una serie de factores o condicionantes específicos relacionados tanto con las actividades humanas como con el entorno natural, los cuales presentan marcadas variaciones a lo largo de esta región. Estos factores incluyen la presencia de *wadis*, abanicos aluviales y sistemas de terrazas cultivadas en las laderas laterales inferiores de los valles y las llanuras de las mesetas, junto con un gran desarrollo urbano y expansión de la agricultura en las zonas más septentrionales, favorecidas por la influencia mesogea. En cambio, en las zonas meridionales, ecológicamente dominadas por la influencia sahariana, la disminución progresiva de las precipitaciones a medida que se avanza hacia el sur provoca un aumento de la aridez y de las condiciones desérticas, dando lugar a un espectro típico de los ambientes esteparios, solo interrumpido por la presencia de los oasis del interior (Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Rieger, 2019, 2023; Vetter *&* Rieger, 2019).

Otros aspectos significativos están relacionados con la información arqueológica de campo disponible, ya que los esfuerzos de investigación previos en esta región se han centrado en lugares específicos, principalmente en las zonas septentrionales de Marmárica occidental (Hulin, 2008; Hulin, Timby *&* Mutri, 2009; Hulin *et al.*, 2010; entre otros) y oriental (Rieger, 2017, 2019, 2023; entre otros) (Figura 3.27). Este enfoque limitado se debe, en gran medida, a la inestabilidad política latente en los territorios fronterizos de Libia y Egipto, lo que ha dificultado el acceso a estas áreas durante las últimas décadas. En consecuencia, no existen estudios exhaustivos que abarquen de manera integral la realidad arqueológica de la región en su totalidad, y muchas áreas aún carecen de investigaciones de campo. Esta ausencia representa un desafío significativo, lo que ha requerido un enfoque flexible para adaptarse a los diversos condicionantes, así como a la disponibilidad de recursos y fuentes de información.

Para afrontar este reto, de manera similar al caso de Creta, el empleo de datos proporcionados por los satélites *Landsat* y *Sentinel-2*, junto con las imágenes de *Google*, *Microsoft* y *ESRI*, han sido especialmente útiles para detectar diversos tipos de anomalías que se identificaron e interpretaron como indicios de sitios arqueológicos. En el caso de Marmárica, la estacionalidad no es un factor tan significativo, ya que la escasa cubierta vegetal facilitaba de forma considerable el proceso de detección. Sin embargo, sí lo son los impactos producidos por las actividades humanas y los procesos medioambientales, los cuales han conducido a un deterioro significativo de estos lugares. Por ello, la temporalidad de los datos empleados, como mapas topográficos, fotografías aéreas históricas e imágenes obtenidas mediante satélite han resultado de gran valor, ya que han proporcionado una visión de paisajes que se han transformado de manera significativa con el paso del tiempo.

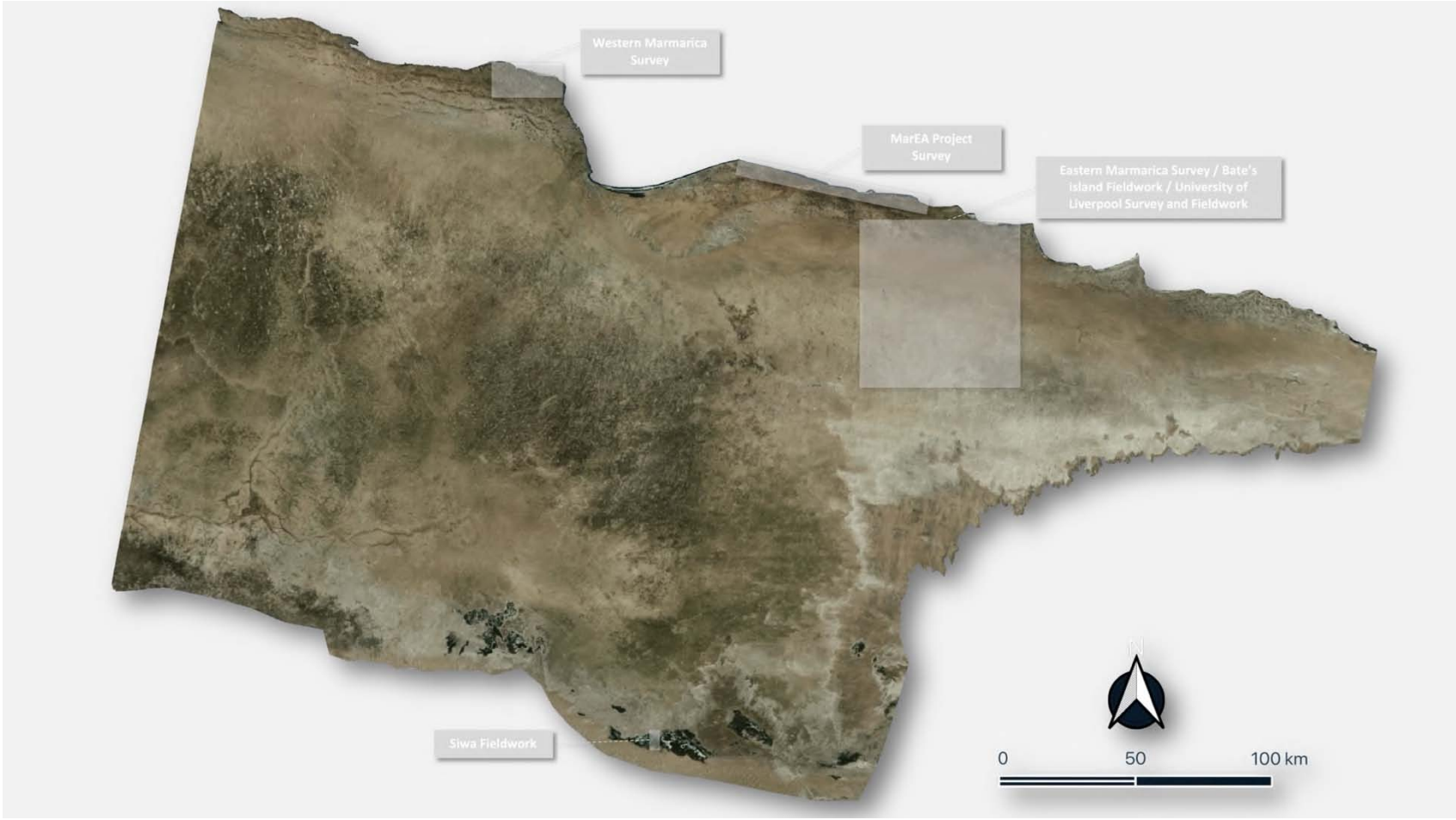


Figura 3.27. Representación general de la región de Marmárica, en el que se destacan los principales proyectos de investigación arqueológicos y las áreas que han sido objeto de estudios mediante trabajos de campo (mapa base: © *Microsoft*).

Otros aspectos asociados específicamente a este caso están relacionados con la naturaleza y funcionalidad de los sitios documentados. En el marco de esta investigación, se han valorado de forma genérica como indicadores antiguos asentamientos, lugares de enterramiento, áreas productivas y zonas históricas de captación de recursos. No obstante, este último grupo está representado principalmente por aquellos sitios destinados a la captación, almacenamiento y gestión de recursos hídricos (principalmente cisternas) en el caso específico de Marmárica. La razón principal radica en la consideración de estos lugares como puntos estructurales para las rutas de tránsito a través de los paisajes áridos o semiáridos que caracterizan esta región (Figuras 3.28 a 3.31). Esta decisión se fundamenta, además, en información cartográfica y metodológica publicada por otros proyectos que han realizado prospecciones arqueológicas sobre el terreno, los cuales destacan la importancia de considerar estos elementos como indicadores arqueológicos clave (Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Rieger, 2019, 2023; Vetter *&* Rieger, 2019; Ray *&* Nikolaus, 2022).



Figura 3.28. La cisterna de Abar Abu Imama (PE_00266), cerca de Dardouma en la llanura premarmárica, data del periodo grecorromano (siglos III / II a.C.), según los numerosos objetos documentados en la superficie, y aún hoy en día sigue en uso (Fuente: Rieger, 2017: 54)



Figura 3.29. En la parte superior se muestran evidencias de actividad humana en forma de fragmentos de cerámica romana cerca de la cisterna de Bir Abu Mukhayat (PE_01697), lo que sugiere un uso frecuente durante al menos ese periodo. De manera similar, en la parte inferior se muestra la variedad de objetos encontrados cerca de la cisterna de Abar el Kanayis (PE_02027), que incluyen desde herramientas de sílex y fragmentos de cerámica hasta objetos de la Segunda Guerra Mundial y botellas de plástico desechadas recientemente. Esto resalta la importancia de estos elementos como nodos de actividad humana a través de los diferentes periodos históricos (Fuente: Vetter, Rieger & Möller, 2013; Rieger, 2017: 61).



Figura 3.30. Diferentes estructuras construidas documentadas que proporcionan información sobre cómo estas comunidades habitaron y moldearon el paisaje a lo largo de Marmárica (Fuente: Rieger *et al.,* 2012: 142; Rieger, 2017, 2023: 16; Vetter *&* Rieger, 2019: 9).



Figura 3.31. Desde un punto de vista bioclimático, Marmárica presenta condiciones semiáridas y áridas. Su orografía varía desde barrancos escalonados y numerosos *wadis* en el norte, hasta grandes llanuras en pendiente hacia el sur, interrumpidas por la presencia de importantes oasis como el de Siwa (PE_01967) en Egipto (Fuente: Cooper, 2022: 12; Rieger, 2023: 12).

De este modo, tras aproximadamente dos años de trabajo, este estudio ofrece la documentación de áreas previamente inexploradas, proporcionando nuevos datos que enriquecen la comprensión arqueológica e histórica de Marmárica. En particular, se han logrado mapear y documentar exhaustivamente extensas áreas del noreste de Libia y noroeste de Egipto, identificando y registrando un total de 3.355 sitios de interés (Figuras 3.32 y 3.33). Se han cubierto así las regiones de Al-Butnan junto al oasis de Al-Jaghbub (Marmárica occidental) con un total de 635 sitios; y Sollum, Sidi Barrani, Marsa Matruh, El Negaila, El Hamam, El Daba, El Alamein y los oasis de Qara y Siwa (Marmárica oriental) con un total de 2.717 sitios. En consecuencia, se han realizado evaluaciones de más de 3.000 registros que representan el patrimonio arqueológico y cultural de esta importante región norteafricana. Esto supone un avance significativo, ya que llena vacíos en la documentación previa y ofrece una base sólida para futuras investigaciones.

Cabe destacar que la significativa diferencia regional en el número de sitios identificados entre Marmárica oriental y occidental pone de manifiesto limitaciones en las fuentes y niveles de información disponibles. Esto implica la necesidad de estudios de campo que amplíen y validen los resultados obtenidos. Esta limitación también dificultó el establecimiento de un marco cronológico preciso para muchos de estos sitios, poniendo de relieve —una vez más— la necesidad de realizar evaluaciones sobre el terreno. Sin embargo, se evidenció una serie de patrones generales de similitudes y distribuciones en cuanto a la naturaleza y funcionalidad de los sitios documentados. Estos abarcan antiguos asentamientos (7%), lugares de enterramiento (28%) y zonas productivas e históricas de captación de recursos (65%), proporcionando modelos sobre densidad y distribución espacial, que de forma preliminar destacan la complejidad y diversidad del paisaje arqueológico de esta región.

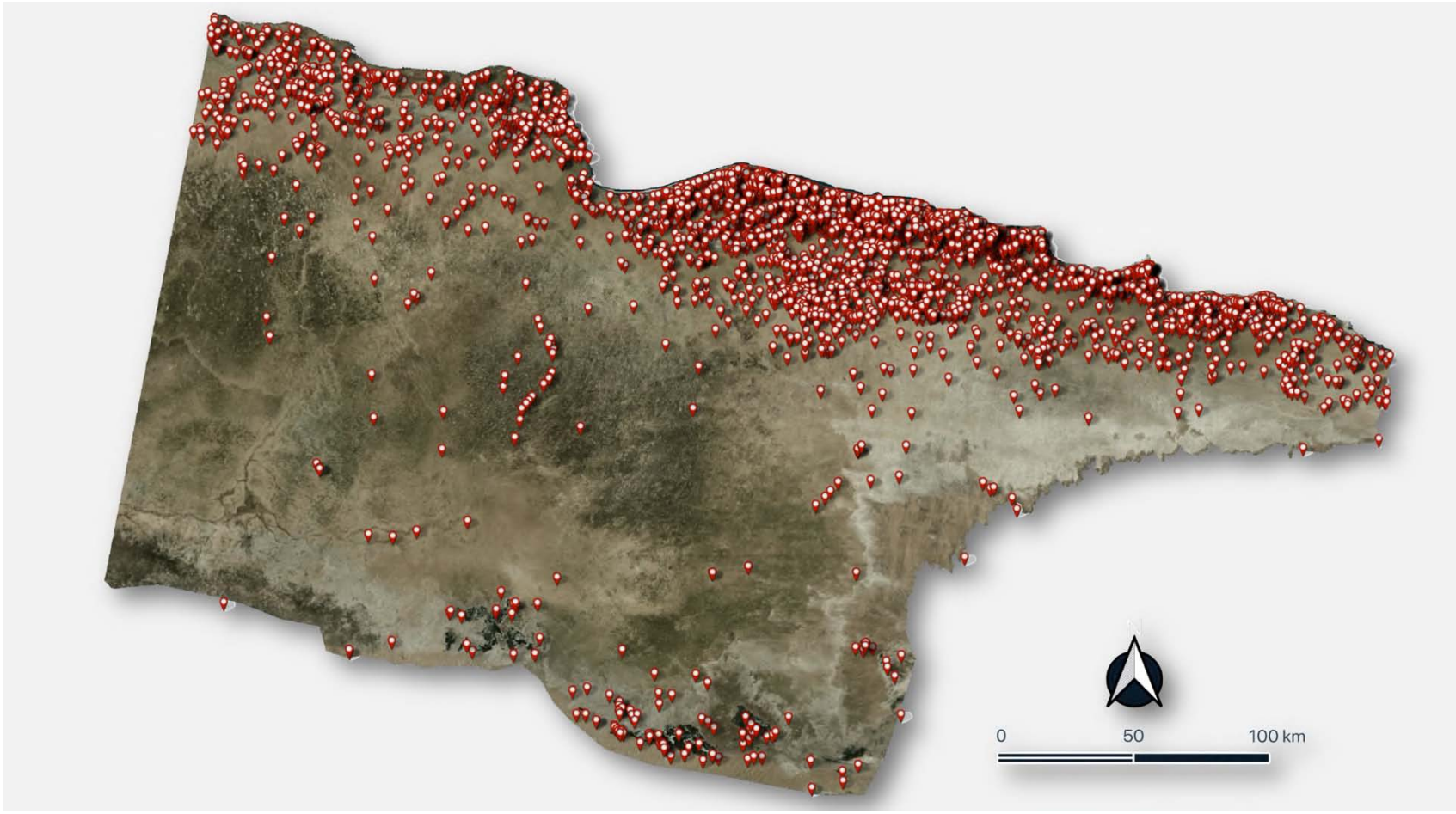


Figura 3.32. Representación de la totalidad de los sitios arqueológicos identificados y registrados en Marmárica. Las áreas cubiertas incluyen importantes regiones históricas, desde Tobruk (PE_03348) (noreste de Libia) hasta El-Alamein (PE_01269) (noroeste de Egipto) en la costa mediterránea, extendiéndose hacia el sur hasta los márgenes del desierto de Libia (Sáhara). Esta amplia cobertura geográfica permite visualizar la distribución de los sitios arqueológicos a lo largo de los diversos paisajes de la región. Sin embargo, el menor porcentaje de asentamientos detectados, en comparación con otros tipos de sitios, subraya la dificultad de rastrear estas poblaciones, ya que no presentan un carácter estrictamente sedentario, al menos hasta época grecorromana. A partir de este período, las evidencias de poblamiento de forma más permanente se vuelven más traceables *(mapa base: © Microsoft).*

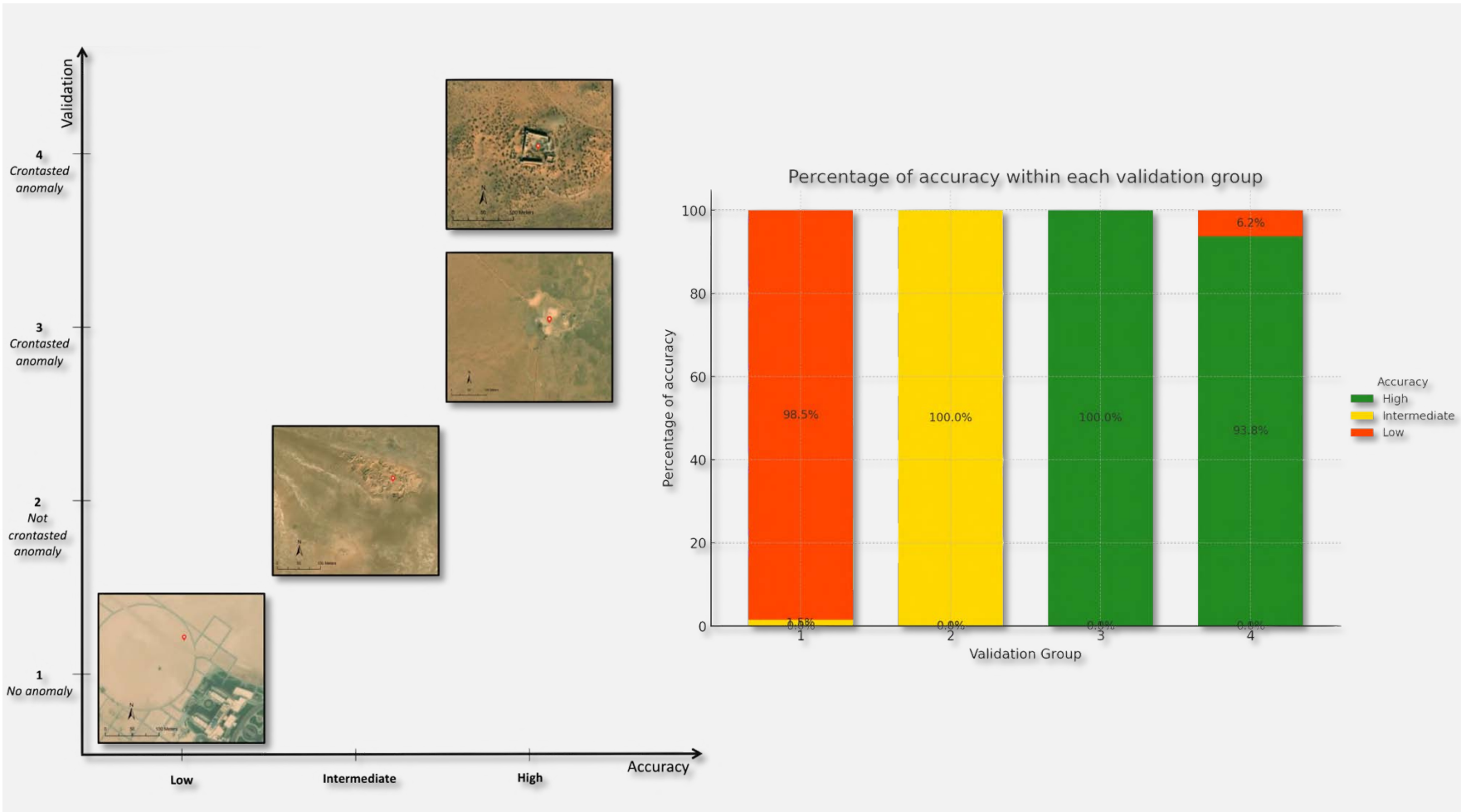


Figura 3.33. (*Izquierda*) Ejemplos de sitios arqueológicos clasificados según el grado de precisión y validación proporcionado por las fuentes de Marmárica. (*Derecha*) Gráfico que muestra la relación entre la precisión y la validación de la totalidad de los sitios documentados. Es importante destacar que, debido a la escasa cobertura vegetal, las tasas de precisión en la digitalización son muy altas.

En cuanto a las rutas documentadas, se digitalizó un total de 197 tramos entre Marmárica occidental y oriental, que corresponden aproximadamente a unos 12.500 km (Figuras 3.34 a 3.36). La documentación detallada de estas rutas proporciona una comprensión integral de la configuración y distribución espacial de las estructuras de movilidad históricas, abarcando tanto las zonas costeras, mejor conocidas, como sus conexiones hacia las áreas del interior.Estos registros funcionan como indicadores de patrones de movilidad y accesibilidad, lo que permite una mejor comprensión de las dinámicas socioeconómicas y culturales en estos paisajes. Además, la clasificación sistemática llevada a cabo para cada registro ha implicado organizar y categorizar cada ruta según criterios específicos, facilitando así el establecimiento de marcos comparativos con otros contextos y regiones.

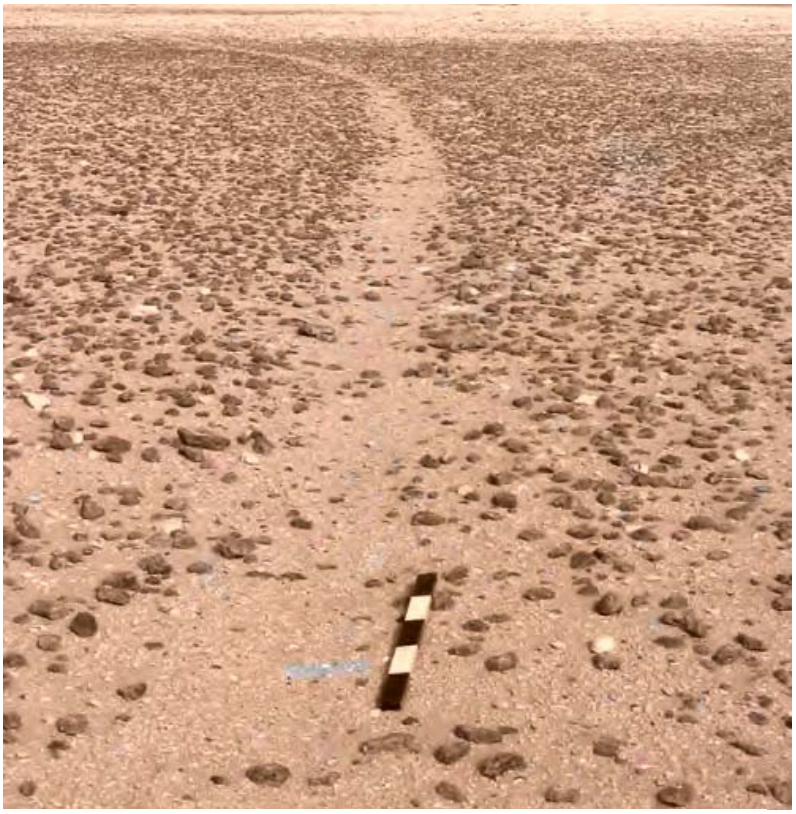


Figura 3.34. Huellas de tránsito a través de la superficie pedregosa cerca de Bir el Qatir (PE_01671) (Fuente: Vetter, Rieger & Möller, 2013: 468).



Figura 3.35. Visualización de la totalidad de las rutas identificadas y registradas durante la investigación en la región de Marmárica.

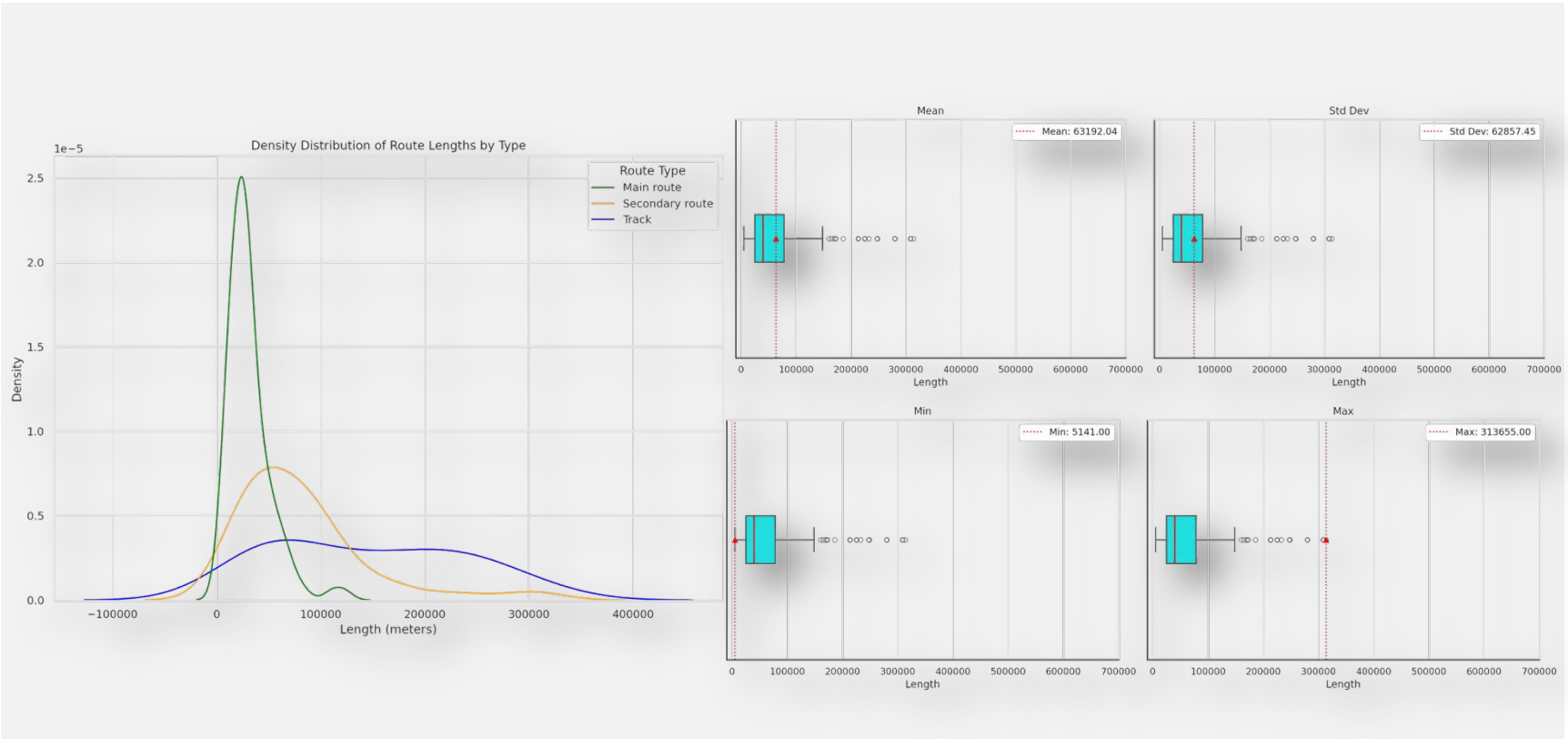


Figura 3.36. (*Izquierda*) Gráfico de densidad que muestra la distribución de las longitudes de las rutas según su tipología. La línea verde representa las rutas principales, caracterizadas por una mayor variabilidad y longitudes más extensas. La línea amarilla indica las rutas secundarias, concentradas en longitudes más cortas. La línea azul corresponde a los caminos, con longitudes intermedias. (*Derecha*) *Boxplots* que representan los valores de longitud de las rutas escalados. Cada gráfico muestra una medida estadística específica (media, desviación estándar, mínimo y máximo). Los valores atípicos se representan como círculos blancos con borde negro.

En cuanto a la evaluación geográfica y ambiental de Marmárica, se emplearon datos de teledetección junto con modelos digitales de elevación para cartografiar masas de agua, evaluar patrones de drenaje, analizar las acumulaciones de las cuencas hidrográficas y estudiar las características topográficas del terreno. Este enfoque permitió la definición de las diversas unidades biogeográficas que componen la región de Marmárica (véase Figura 3.7b). Como resultado, se generaron conjuntos de datos precisos que incluyen variables medioambientales, como las formas del terreno, las características del agua y variables climáticas, tales como las pautas de precipitación y la temperatura (Figura 3.37a). Asimismo, se incorporaron características antropogénicas, como la intensificación de la agricultura, la expansión urbana (Figura 3.37b) y la cobertura del terreno (Figura 3.37c).

Esta información permitió evaluar de manera sistemática los diversos paisajes de la región, los cuales se caracterizan principalmente por vastas extensiones de entornos áridos y semiáridos, pero que han experimentado rápidas transformaciones, especialmente en sus partes septentrionales, debido al aumento de actividades de desarrollo regional, como la expansión urbana y la intensificación de la agricultura. Estos patrones, que serán abordados con mayor detalle en los siguientes capítulos, también se observan, aunque en menor medida, en los oasis del interior. Este enfoque integral y sistemático ha permitido no solo mapear y analizar aspectos relacionados con el entorno natural y el desarrollo regional en Marmárica, sino también comprender mejor el contexto y las dinámicas de cambio asociadas al patrimonio arqueológico de esta región norteafricana.

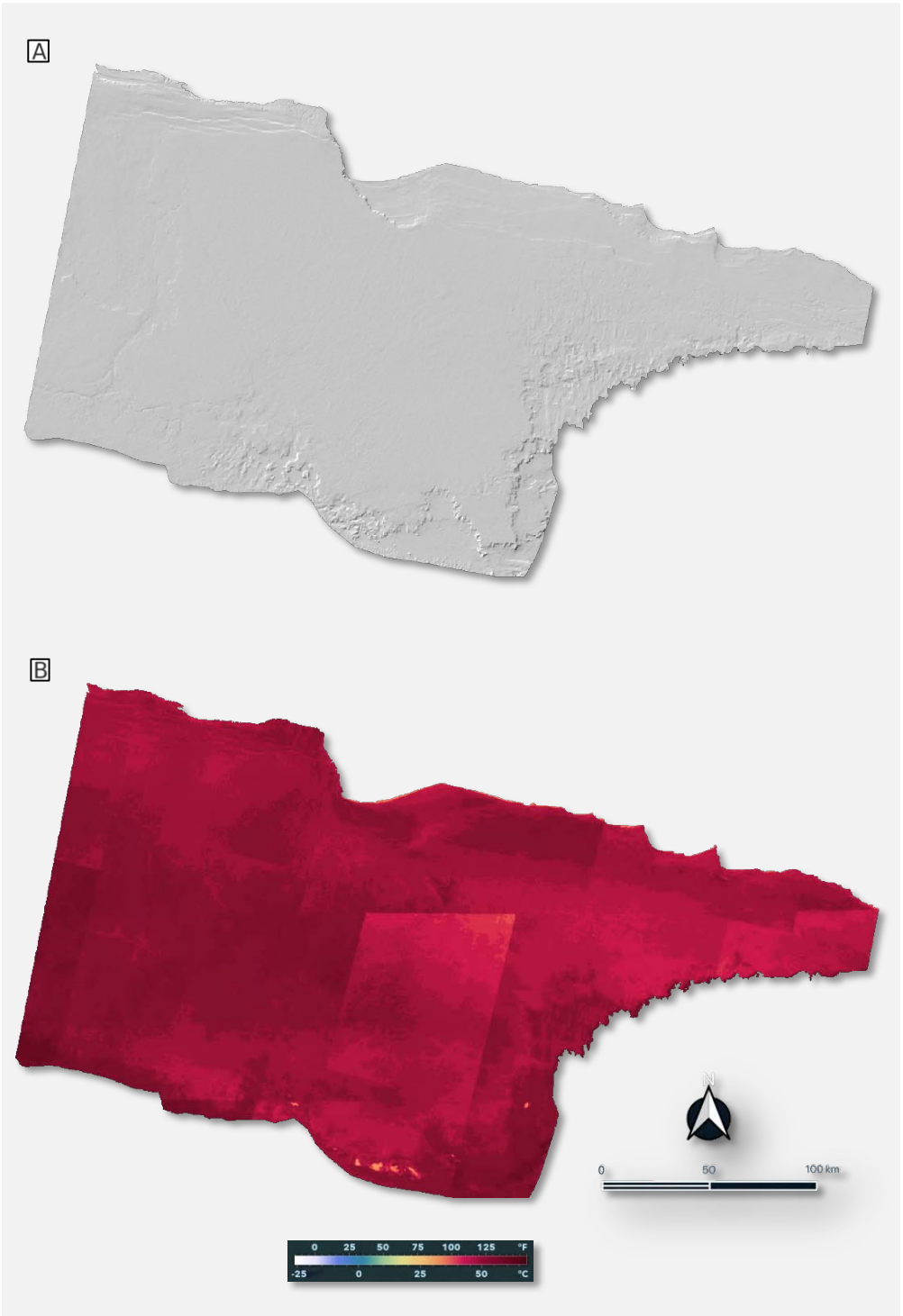


Figura 3.37a. (A) Representación topográfica de Marmárica, resaltando las características físicas del relieve. (B) Representación media anual de la temperatura en la región, mediante un esquema de colores que muestra la variabilidad entre las diferentes zonas que la componen (Fuente: *Sentinel-2*).

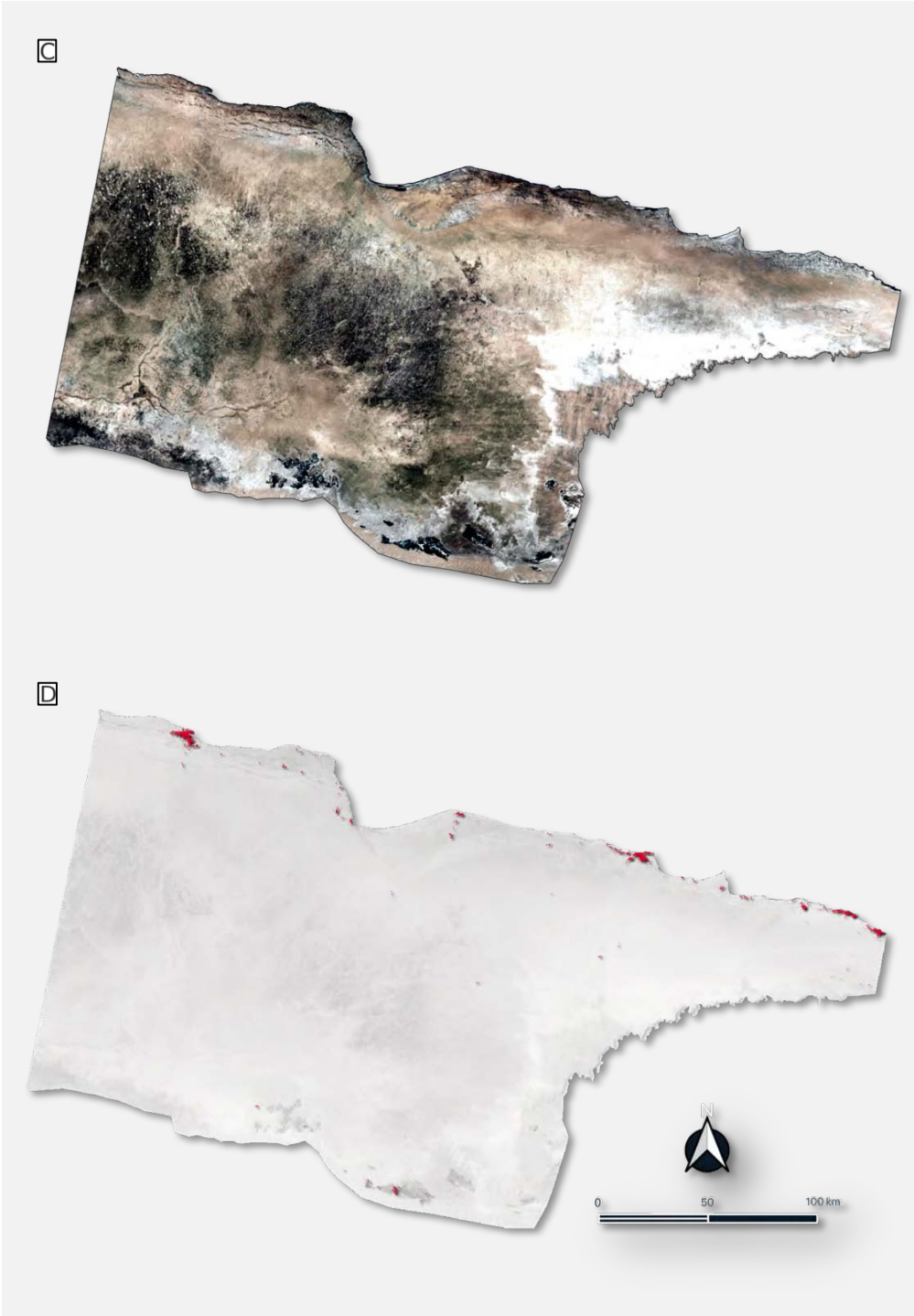


Figura 3.37b. (C) Representación que muestra la distribución, naturaleza y relación geológica y sedimentaria de la superficie de Marmárica. **(**D) Las zonas rojas representan áreas que han experimentado un desarrollo urbano significativo durante las últimas décadas (Fuente: *Sentinel-2*).

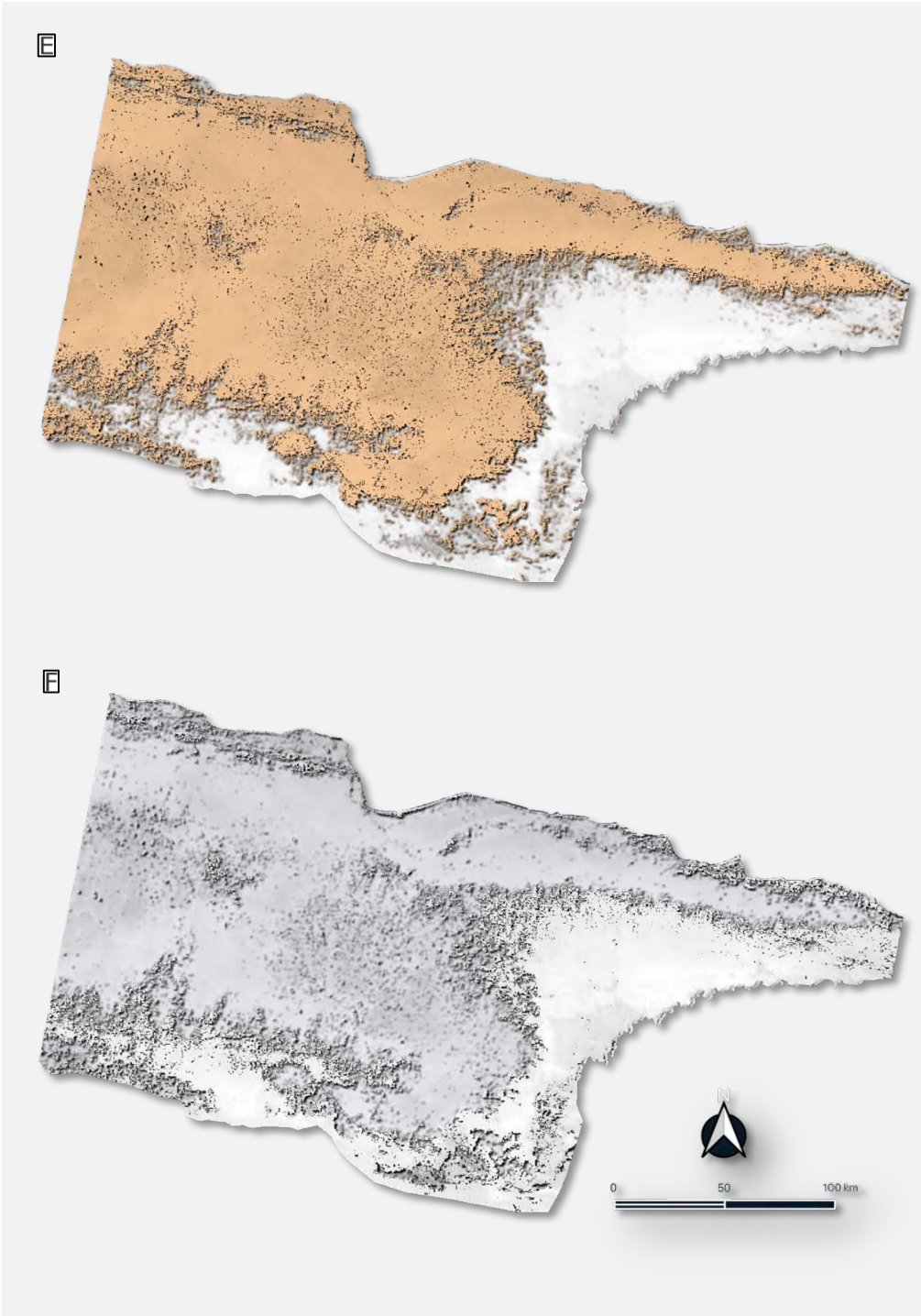


Figura 3.37c. Representación de la cobertura del terreno en la región de Marmárica. (E) Las zonas marrones indican áreas con escasa vegetación, caracterizadas por una mezcla de paisajes con suelo expuesto o claros cubiertos de matorrales y tundra, típicos de ambientes esteparios. (F) Las zonas gris claro representan áreas de roca o suelo con vegetación mínima o inexistente durante todo el año, así como grandes extensiones de arena y desierto (Fuente: *Sentinel-2*).

IV

LA COMPLEJIDAD ESPACIAL DEL PAISAJE ARQUEOLÓGICO

IV
LA COMPLEJIDAD ESPACIAL DEL PAISAJE ARQUEOLÓGICO

4.1 MODELOS COMPUTACIONALES & CUANTITATIVOS EN ARQUEOLOGÍA

4.1.1 Modelización de Sistemas Complejos

La variabilidad y complejidad observada en la evidencia arqueológica a lo largo de las diversas topografías que conforman las regiones estudiadas refleja la naturaleza intrincada de los paisajes arqueológicos. Esta complejidad pone de manifiesto que dichos paisajes no son simplemente una mera acumulación de elementos físicos, sino el resultado de interacciones dinámicas y continuas entre las sociedades humanas y el entorno natural a lo largo del tiempo (Trigger, 1967; David & Thomas, 2016; Knapp, 2018; Crellin & Harris, 2021). Este reconocimiento planteó la necesidad de establecer vías efectivas para estudiar dichas relaciones, teniendo en cuenta además la variedad de factores y agentes que influyeron en estas dinámicas. En este contexto, el uso de modelos computacionales se presenta como una herramienta clave, proporcionando a los arqueólogos/as medios efectivos con las que simular, analizar y predecir tales procesos (Crema, Bevan & Lake, 2010; Crema, 2015; Nakoinz & Knitter, 2016; Rubio-Campillo, Cela & Hernández-Cardona, 2012, Rubio-Campillo, 2017; Pardo-Gordó, 2017; entre otros). A lo largo de este y los siguientes capítulos, se profundizará en los fundamentos y metodologías empleadas para la identificación de patrones y tendencias en los datos, con el fin de reflejar las complejas dinámicas socioecológicas que han marcado la formación y evolución de estos paisajes.

En línea con esta argumentación, se parte de la premisa de que los paisajes no se componen de conjuntos de elementos aislados, sino que son el resultado de múltiples procesos entrelazados que operan a través de diversas escalas espaciales y temporales (Fitzhugh *et al.*, 2018; Marquardt, 2019; McGovern, Hambrecht, & Hicks, 2019). Por lo tanto, el enfoque adoptado debía facilitar la integración de datos empíricos junto a supuestos teóricos en un marco coherente que permitiera analizar cómo diversos factores y procesos interdependientes se combinaron para dar forma a los paisajes observados. Este enfoque de investigación exploratorio se fundamenta en la creación de modelos destinados a conceptualizar y analizar estos sistemas complejos (Pardo-Gordó, 2017). Mediante la modelización, es posible explorar diferentes escenarios y evaluar cómo diversas variables pudieron haber influido en la configuración del paisaje, lo que, a su vez, permite validar o refinar las hipótesis planteadas (Rubio-Campillo, Cela & Hernández-Cardona, 2012; Shennan *et al.*, 2013; Crema, 2015).

La idea subyacente es que es posible obtener una comprensión más precisa y completa de cómo operaban los sistemas socioeconómicos y socioecológicos mediante la modelización y análisis de determinados factores contextuales. Esta perspectiva permite explorar las relaciones entre el medioambiente y las comunidades humanas como interacciones dinámicas y en constante evolución (Eriksson *et al.*, 2018). Este dinamismo es esencial para comprender los procesos de adaptación y cambio, donde el registro arqueológico representa la suma de numerosas actividades humanas a lo largo del tiempo (Ingold, 1993, 2017). Sin embargo, dado que este registro es fragmentario, la observación directa no es suficiente para captar plenamente la complejidad inherente a estos sistemas. Por ello, la modelización computacional emerge como una herramienta esencial para reconstruir dinámicas subyacentes,

permitiendo una interpretación más integral y matizada de los procesos históricos y ecológicos que moldearon las sociedades y paisajes estudiados.

4.1.2 Sobre el concepto de "cuantificación"

Si se considera la base sobre la cual se crean estos modelos, surge de manera fundamental el concepto de "cuantificación". La cuantificación es el proceso de convertir observaciones cualitativas, como descripciones y características, en datos cuantitativos que pueden medirse y expresarse mediante valores numéricos (Shennan, 1988; Aldenderfer, 1998; Baxter, 2003; Haining, 2003; Freedman, 2009; Hubbard, 2010; Barceló *&* Bogdanovic, 2015; entre otros). Además, cuantificar permite el uso de técnicas y métodos matemáticos para analizar conjuntos de datos, facilitando la identificación de patrones y tendencias que pueden no ser evidenciadas a través de observaciones cualitativas (Barceló *et al.,* 2015; Barceló, 2017a, 2017b). Cada vez que se establece una relación ordenada entre componentes es, en esencia, utilizar un lenguaje matemático, lo que refuerza la importancia de la cuantificación en la creación de estos modelos (Barceló *et al.*, 2015). Esto es especialmente útil en arqueología, donde la dimensión "espacial" y "contextual" de los datos son componentes críticos que se benefician enormemente de estas aproximaciones. Esto permite a los arqueólogos/as disponer de herramientas para analizar la distribución y las relaciones espaciales de determinadas entidades, mediante el análisis de patrones que no solo aportan información sobre la disposición física de los elementos en el paisaje, sino que también revelan las interacciones subyacentes —culturales, sociales, económicas, políticas y naturales— que han moldeado a estas sociedades y los paisajes que habitaron a lo largo del tiempo.

No obstante, el uso de modelos cuantitativos en investigación arqueológica no es un desarrollo reciente; de hecho, comenzó a ganar relevancia durante las décadas de 1960 y 1970, en paralelo con el surgimiento y auge de la arqueología procesual (Gamble, 2001). Esta corriente promovía un enfoque más "científico", distanciándose de los métodos más tradicionales y allanando el camino para la incorporación de técnicas cuantitativas para el estudio e interpretación de los datos arqueológicos. Entre los trabajos pioneros en este ámbito destacan el de Frank. R Hodson, David G. Kendall y Petre Tăutu con su libro *Mathematics in the Archaeological and Historical Sciences* (1971), o el de James E. Doran y Frank R. Hodson, *Mathematics and Computing in Archaeology* (1975), donde exploran la aplicación de modelos matemáticos y computacionales en el ámbito de la investigación arqueológica. Poco después, Ian Hodder y Clive Orton profundizaron en el análisis espacial en arqueología con su obra *Spatial Analysis in Archaeology* (1976). Asimismo, David L. Clarke, con sus libros *Analytical Archaeology* (1977) y *Spatial Archaeology* (1977), estableció las bases de una metodología que integraba técnicas de otras disciplinas, como la geografía y la informática. Finalmente, otro ejemplo representativo de estas primeras etapas es el de Peter Ihm, con su trabajo *Statistik in der Archäologie* (1978), donde abordó problemas y métodos específicos para la aplicación de aproximaciones estadísticas en arqueología (Carrero-Pazos, 2023: 35).

Durante las décadas posteriores, la metodología cuantitativa experimentó un crecimiento significativo, especialmente a partir de finales de los 80 y durante la década de los 90, impulsada por el desarrollo tecnológico y los avances en las ciencias de la computación (Bevan, 2020: 60). Algunas contribuciones significativas de autores como Clive Orton y Steve Shennan, cuyas obras *Mathematics in Archaeology* (1988) y *Quantifying Archaeology* (1988)

respectivamente, fueron referentes en este sentido. A medida que estas aproximaciones continuaron evolucionando, surgieron numerosos trabajos que ampliaron y mejoraron las técnicas y métodos disponibles. Estos estudios abordaron una amplia gama de temas, desde estadísticas básicas hasta análisis espaciales avanzados, proporcionando a los arqueólogos/as herramientas cada vez más precisas y sofisticadas para analizar e interpretar el registro arqueológico. Algunos ejemplos representativos son *Digging Numbers: Elementary Statistics for Archaeologists* (Fletcher *&* Lock, 1991); *Exploratory Multivariate Analysis in Archaeology* (Baxter, 1994); *Statistics in Archaeology* (Baxter, 2003); *Statistics for Archaeologists: a commonsense approach* (Drennan, 2009); *Quantitative Analysis in Archaeology* (VanPool *&* Leonard, 2011); *Computational Approaches to Archaeological Spaces* (Bevan *&* Lake, 2013); *Archaeology in the Digital Era* (Earl *et al.*, 2014); *Mathematics and Archaeology* (Barceló *&* Bogdanovic, 2015); *Quantitative Methods in Archaeology using R* (Carlson, 2017); *Archaeology and Geomatics* (Mayoral-Herrera, Parcero-Oubiña *&* Fábrega-Álvarez, 2017); y/o *Archaeological Spatial Analysis: A Methodological Guide* (Gillings, Hacigüzeller *&* Lock, 2020). Como resultado de estas contribuciones (entre muchas otras) y del continuo desarrollo tecnológico, los enfoques cuantitativos han acabado por consolidarse como un campo de estudio fundamental dentro de la investigación arqueológica contemporánea. En consecuencia, las herramientas y metodologías desarrolladas en este campo facilitan en la actualidad a los arqueólogos/as investigar con mayor detalle y precisión los procesos que moldearon sociedades y paisajes, revelando patrones y relaciones que serían difíciles de discernir mediante otro tipo de aproximaciones.

4.1.3 Del Análisis Espacial a las técnicas de Aprendizaje Automático

Ante este panorama en constante evolución, el influjo de las tecnologías digitales y los enfoques computacionales han ampliado significativamente el espectro de aplicaciones disponibles, entre las que se incluyen técnicas avanzadas de muestreo, análisis de componentes principales, análisis de correspondencias múltiples, álgebra de mapas, autocorrelación espacial, análisis de patrones de puntos, modelos de regresión, *kriging*, clasificación, seriación, teoría de grafos, estadística bayesiana, entre muchas otras (Castiello, 2022: 26). En este contexto, a pesar de la amplia diversidad de métodos y técnicas disponibles, estas pueden agruparse de forma genérica en categorías que corresponden a diferentes tipos de modelos computacionales utilizados en arqueología. Estas categorías, en las que se profundizará un poco más a los largo de este apartado, engloban el análisis espacial, que se enfoca en la distribución y relaciones espaciales de los elementos arqueológicos; estadística, que abarca métodos cuantitativos de análisis de datos; ciencia de redes, que estudia las relaciones y conexiones entre diferentes elementos; modelos basados en agentes, que simulan las interacciones de individuos o grupos dentro de un sistema; y de aprendizaje automático (*machine learning*), que aplica algoritmos para identificar patrones y hacer predicciones basadas en datos.

Es importante destacar que los modelos computacionales no son estancos ni limitados, sino que se enriquecen mediante la incorporación de principios y métodos de áreas de estudio como la geografía cuantitativa o las ciencias de la computación (Bevan, 2020). Un ejemplo particularmente representativo es el análisis espacial, que posee una naturaleza intrínsecamente estadística (Barceló, 2017: 31). Esto se debe a que emplea métodos matemáticos para

identificar patrones y relaciones espaciales, así como para considerar factores geográficos y ambientales que influyen en la distribución y configuración de la evidencia arqueológica. Esto es esencial para el estudio de patrones de ocupación, dinámicas de poblamiento y usos del suelo; además, el análisis espacial proporciona una base sólida para generar y validar hipótesis sobre aspectos relacionados con la movilidad, la interacción social y la organización territorial (Hodder & Orton, 1976; Connolly & Lake, 2009; Olaya, 2016). Esta capacidad analítica permite interpretar y comprender las dinámicas espaciales y contextuales que moldearon los complejos paisajes sociales a lo largo del tiempo.

A pesar de que los métodos estadísticos conforman la base de los modelos computacionales, la estadística en sí misma constituye un campo de estudio independiente dentro de la disciplina arqueológica. Esto significa que estos métodos también se utilizan de manera autónoma para explorar y analizar las relaciones entre conjuntos de datos y sus atributos. De este modo, la estadística proporciona herramientas esenciales para la gestión de grandes volúmenes de datos, la realización de análisis descriptivos y exploratorios, y la validación de hipótesis mediante inferencia probabilística (Barceló *et al.*, 2015, Barceló, 2017). Esto último es particularmente útil en arqueología, donde la información disponible a menudo es fragmentaria. Por tanto, esto hace que estas aproximaciones sean cruciales, ya que permiten manejar la incertidumbre inherente a los datos, mejorando así la validez de los resultados e interpretaciones que se realizan a partir de ellos.

Por otra parte, también es importante distinguir claramente entre los modelos basados en análisis espacial y aquellos que emplean métodos de ciencia de redes. Aunque ambos enfoques pueden complementarse, pertenecen a

campos de estudio distintos, cada uno con sus propios fundamentos teóricos y metodológicos. Como se explicó en el marco teórico de este trabajo (Cap. II, *Redes*), la ciencia de redes se centra en el estudio de las relaciones y conexiones entre diferentes entidades, ya sean personas, objetos, sitios o incluso conceptos. A diferencia del análisis espacial, que se enfoca en la distribución y disposición de elementos en el espacio geográfico, los enfoques de redes tienen la capacidad de integrar dimensiones tanto físicas como sociales al analizar determinadas regiones y comunidades (Brughmans *et al.*, 2023; Brughmans *&* Peeples, 2023). La teoría de grafos, originalmente desarrollada en el ámbito de las matemáticas, es una herramienta clave en este sentido, permitiendo a los arqueólogos/as modelar y analizar redes de interacción, relaciones sociales o la distribución de tecnologías. Estas redes pueden ser simples, como la relación directa entre dos sitios arqueológicos, o complejas, involucrando múltiples entidades y mecanismos de intercambio (Barabási, 2002, 2012). Al analizar estas redes, es posible inferir la estructura social, identificar nodos centrales que funcionaban como puntos clave de intercambio o control, y comprender mejor las dinámicas de cooperación y competencia entre distintas regiones y comunidades (Knappett, 2011). Esto proporciona una visión más holística de cómo los elementos interactúan dentro de un marco geográfico y social, ofreciendo una comprensión más rica de las dinámicas que estructuran los paisajes arqueológicos.

Otro paso significativo en el ámbito de la modelización fue, sin duda, el desarrollo de modelos basados en agentes (ABM, por sus siglas en inglés). Estos modelos son un tipo de simulación computacional que permite conceptualizar y estudiar sistemas complejos (Romanowska, Wren *&* Crabtree, 2021; Rodríguez-Rellán *&* Fábregas-Valcarce, 2023: 123). Esto se debe a que posibilitan la representación de dinámicas a macroescala en

sistemas donde los comportamientos y decisiones de los agentes individuales contribuyen a la formación de patrones en el conjunto del sistema (Palacios, 2023b). En estos modelos, los individuos o grupos se modelan como agentes autónomos que interactúan entre sí y con su entorno de manera dinámica, donde estas interacciones pueden dar lugar a la emergencia de comportamientos complejos (Pardo-Gordó, 2017). Por lo tanto, la capacidad de modelar interacciones es una de las principales ventajas de estos enfoques, ya que permiten simular "mundos virtuales" donde se pueden estudiar dinámicas socioecológicas a diferentes escalas espaciales y temporales (Bernabeu Auban, Moreno Martín & Barton, 2012; Barton, 2014; Pardo-Gordó, 2017). Sin embargo, como cualquier otro enfoque computacional, no están exentos de críticas. Una de las principales se refiere a la dificultad para validar estos modelos, ya que, al utilizar datos empíricos tanto para construir como para validar el modelo, existe el riesgo de que los resultados reflejen simplemente los supuestos iniciales (Palacios, 2023b: 29). A pesar de estas limitaciones, estos modelos de simulación son especialmente útiles para explorar hipótesis sobre patrones sociales complejos, relacionados con dinámicas culturales, la expansión territorial y la adaptación al cambio ambiental.

Finalmente, cabe destacar el auge de la inteligencia artificial (IA), que, aunque en la actualidad ha trascendido su influencia más allá de los círculos profesionales y académicos, alcanzando a la sociedad en general, en origen es una disciplina que nace en los años 60, dedicada al desarrollo de algoritmos para replicar las funciones cognitivas humanas, como el aprendizaje, la toma de decisiones o la resolución de problemas (Palacios, 2023b: 31). Dentro del campo de la IA, el aprendizaje automático o *machine learning* se destaca como un subcampo especializado en el diseño y programación de algoritmos

capaces de analizar grandes volúmenes de datos y construir modelos predictivos a partir de ellos. A medida que se "alimenta" a estos modelos con más datos, su capacidad de mejora y predicción aumenta (Davis, 2020; Ramazzotti, 2020; Bickler, 2021). Así, estos algoritmos se entrenan para reconocer patrones, clasificar información y hacer predicciones basadas en nuevos conjuntos de datos relacionados (Bickler, 2021: 186). De forma genérica, estos algoritmos pueden dividirse en dos categorías principales: aprendizaje supervisado y no supervisado. En el aprendizaje supervisado, los algoritmos se entrenan con datos etiquetados —i.e., aprenden a partir de ejemplos donde la respuesta ya se conoce, aplicando posteriormente este conocimiento para realizar predicciones sobre nuevos datos. En contraste, en el aprendizaje no supervisado, los algoritmos analizan datos no etiquetados, explorándolos de manera autónoma en busca de patrones y estructuras sin información previa (Palacios, 2023b: 32-33). Además, estos algoritmos son extremadamente versátiles y pueden analizar una amplia gama de tipos de datos, desde numéricos y textuales hasta imágenes y datos espaciales y temporales (Castiello, 2022; Ramazzotti, 2020).

Si bien este estudio integra aproximaciones de casi todos los enfoques mencionados (con la excepción de los modelos basados en agentes), y en los que se profundizará a lo largo de este y los siguientes capítulos, aquí se destaca específicamente la aplicación de modelos para detectar y explorar posibles patrones, y examinar si la localización y distribución espacial de los sitios arqueológicos documentados podrían estar relacionadas con factores específicos o determinadas variables. De manera complementaria, también se detalla cómo se ha construido un modelo predictivo utilizando un algoritmo de aprendizaje automático (*machine learning*) para evaluar el impacto de las acciones antropogénicas y los procesos medioambientales en la conservación

del patrimonio arqueológico. Estas aproximaciones se apoyan en métodos estadísticos que se enmarcan dentro del análisis espacial y los modelos de aprendizaje automático, y se fundamentan en un largo desarrollo de métodos cuantitativos aplicados en arqueología.

Antes de profundizar en estos aspectos, es importante reconocer que, a pesar de las oportunidades que ofrecen todos estos enfoques y aproximaciones, también presentan desafíos significativos. Estos están relacionados principalmente con la formación especializada que se requiere para desarrollar y aplicar estos modelos de manera efectiva, así como con la complejidad inherente que implica su implementación en el ámbito arqueológico, donde frecuentemente se trabaja a partir de registros fragmentarios. Además, la creación de estos modelos no debe ser concebida como un fin en sí mismo, sino como un medio para gestionar y explorar grandes volúmenes de datos, simular escenarios y validar hipótesis arqueológicas. La teoría guía tanto la construcción como la aplicación de los modelos, y los resultados obtenidos pueden mejorar las teorías existentes. Esta relación entre teoría y método es esencial para el avance de la disciplina. Como señalan Ebert y Kohler "explicar las cosas en arqueología es, de hecho, una vía de doble sentido, una progresión de teoría y método" (Ebert & Kohler, 1988: 102). Así pues, dado que la modelización ha sido central en esta investigación, es necesario profundizar en los tipos de modelos empleados y cómo se han integrado.

4.2 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

4.2.1 Patrones de distribución de los sitios arqueológicos

En esta sección, se introduce el concepto de análisis de patrones de distribución de puntos, como un conjunto de métodos estadísticos utilizados para examinar cómo se localizan y distribuyen espacialmente los sitios arqueológicos en una determinada región (Connolly *&* Lake, 2009; Bevan, 2020). En el contexto de esta investigación, los puntos representan las localizaciones geográficas de los sitios arqueológicos documentados, y el análisis se centra en identificar patrones dentro de esa distribución. Para ello, se emplearon distintas técnicas que permitieron evaluar aspectos, como la densidad (intensidad) de los sitios —i.e., identificar áreas con alta o baja concentración—, así como el tipo de distribución que presentan. Para determinar si esta distribución seguía un patrón aleatorio o si, por el contrario, existen patrones que sugieren una distribución no aleatoria, se utilizaron los test de Aleatoriedad Espacial Completa (*Complete Spatial Randomness*, CSR) y de Hopkins-Skellam (Baddeley, Rubak *&* Turner, 2015; Rodríguez-Corral *&* Rodríguez-Rellán, 2023). Estos métodos están diseñados para identificar patrones y evaluar la posible influencia de factores específicos en la ubicación y distribución de los sitios arqueológicos. Finalmente, también se aplicaron análisis de percolación para explorar las propiedades de conectividad entre antiguos asentamientos, y así poder obtener información sobre posibles redes de interacción y organización territorial (Maddison, 2020; Maddison *&* Schmidt, 2020). En conjunto, estas aplicaciones permiten la identificación de áreas de especial interés, la detección de patrones en la distribución de los sitios, y el análisis de la conectividad entre ellos, contribuyendo así a una mejor comprensión de las dinámicas que moldearon el paisaje arqueológico de las regiones estudiadas.

Análisis de Densidad

Una forma de realizar una primera evaluación de la distribución espacial de los sitios arqueológicos documentados es mediante la representación formal de los resultados obtenidos tras la fase de mapeo arqueológico (véase Cap. III, 3.4 Estudios de caso). Esta primera aproximación observacional permite identificar relaciones espaciales entre estos elementos, incluyendo indicadores contextuales de tipo antropogénico y medioambiental. Sin embargo, en ciertos casos, dependiendo de la escala de análisis, las altas concentraciones de sitios pueden dificultar la identificación de límites claros entre agrupaciones. Por esta razón, en este estudio se planteó la posibilidad de explorar estas relaciones de manera más precisa mediante aproximaciones cuantitativas. Estas aproximaciones pueden contribuir a describir cambios en la frecuencia, densidad (o más específicamente, en la intensidad), localización y distribución de los sitios arqueológicos documentados.

Un método muy común para explorar la intensidad de un patrón de puntos (sitios arqueológicos), es la estimación de la densidad de Kernel (*Kernel Density Estimation*, KDE) o estimación de la densidad del núcleo. Esta técnica estadística no paramétrica —i.e., la distribución de la muestra no necesariamente presenta una forma específica—, se aplica frecuentemente en análisis espacial para estimar la densidad de puntos en un espacio continuo (Connolly *&* Lake, 2009; Bevan, 2020). El proceso del KDE comienza con la elección en un entorno SIG de la función *kernel*, que es una función simétrica centrada en cada punto de la muestra y se emplea para calcular la densidad en las proximidades de cada uno de estos puntos. En este caso, la densidad se estima sumando los valores que la función asigna a cada sitio en función de

su proximidad a otros, permitiendo identificar concentraciones y variaciones en la distribución espacial (Figura 4.1) (Bevan, 2020: 61-63).

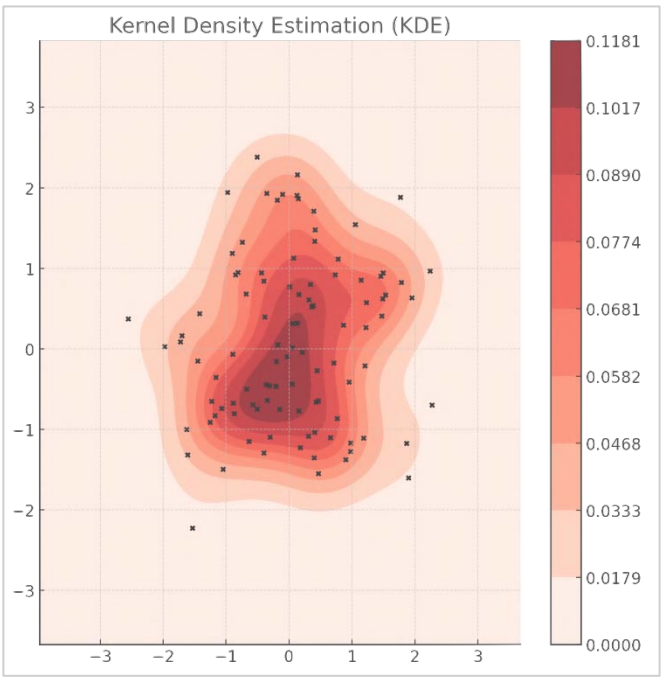


Figura 4.1. Simulación de estimación de densidad mediante el método de *Kernel Density Estimation* (KDE) aplicado a una distribución de puntos simulada.

Es importante destacar que hay dos parámetros fundamentales que pueden configurarse. En primer lugar, el tipo de función utilizada, generalmente la gaussiana, que pondera todos los puntos de la muestra en cada cálculo y asigna un peso dependiendo del grado de cercanía a otros puntos (Baddeley, Rubak *&* Turner, 2015; Bevan, 2020: 63). En segundo lugar, el ancho de banda, que determina la amplitud de la función. En términos generales, si se selecciona un ancho de banda demasiado grande se suaviza la distribución en exceso, lo que puede generar una representación demasiado generalizada. En cambio, un ancho de banda demasiado pequeño puede crear picos pronunciados en la estimación, lo que distorsiona la verdadera representación de los datos (Connolly *&* Lake, 2009: 234).

Este método proporciona como resultado la creación de un mapa ráster, es decir, un tipo de representación espacial en la que el área de estudio se divide en una cuadrícula regular compuesta por celdas o píxeles, donde cada celda representa la intensidad del patrón de puntos en la proximidad del núcleo. Esta superficie de densidad se visualiza comúnmente mediante un mapa de calor, en el que los colores más intensos suelen indicar áreas de mayor densidad de puntos —i.e., áreas con alta concentración de sitios—, y los colores más claros representan áreas de menor densidad —i.e., áreas con baja concentración de sitios (Figura 4.1).

Test de Aleatoriedad Espacial Completa

Hasta ahora se ha considerado el análisis de las propiedades genéricas de un patrón de puntos (en este caso, sitios arqueológicos), las cuales tienen que ver con la densidad (intensidad) espacial que presentan estos puntos y, específicamente, con si esta intensidad es homogénea o no a lo largo de la zona de estudio. Cuando se observa que el patrón no es homogéneo, puede inferirse la incidencia de factores o condicionantes internos o externos (Hodder *&* Orton, 1976; Connolly *&* Lake, 2009). En consecuencia, el siguiente paso consistió en explorar gráfica y estadísticamente la estructura interna del patrón espacial que presentaban los sitios arqueológicos documentados. En concreto, en determinar si estos siguen una distribución agrupada (*cluster*), regular (uniforme) o si, en cambio, lo hacen de manera independiente (aleatoria) (Figura 4.2) (Nakoinz *&* Knitter, 2016; Olaya, 2016; Bevan, 2020: 64; Rodríguez-Corral *&* Rodríguez-Rellán, 2023: 6). Un aspecto clave fue descartar la hipótesis de que los sitios son independientes entre sí y que no existen dependencias o relaciones espaciales entre ellos. De ser así, esto implicaría la existencia de una aleatoriedad espacial completa (CSR, en adelante) (Olaya,

2016; Bevan, 2020). Esto significa que cualquier punto en el espacio tiene la misma probabilidad de contener otro punto, independientemente del contexto. Tal aleatoriedad sugeriría que los sitios estaban dispersos al azar a lo largo de la zona de estudio, y que no hay interacciones ni aparentes relaciones espaciales discernibles entre ellos o con otros elementos del paisaje.

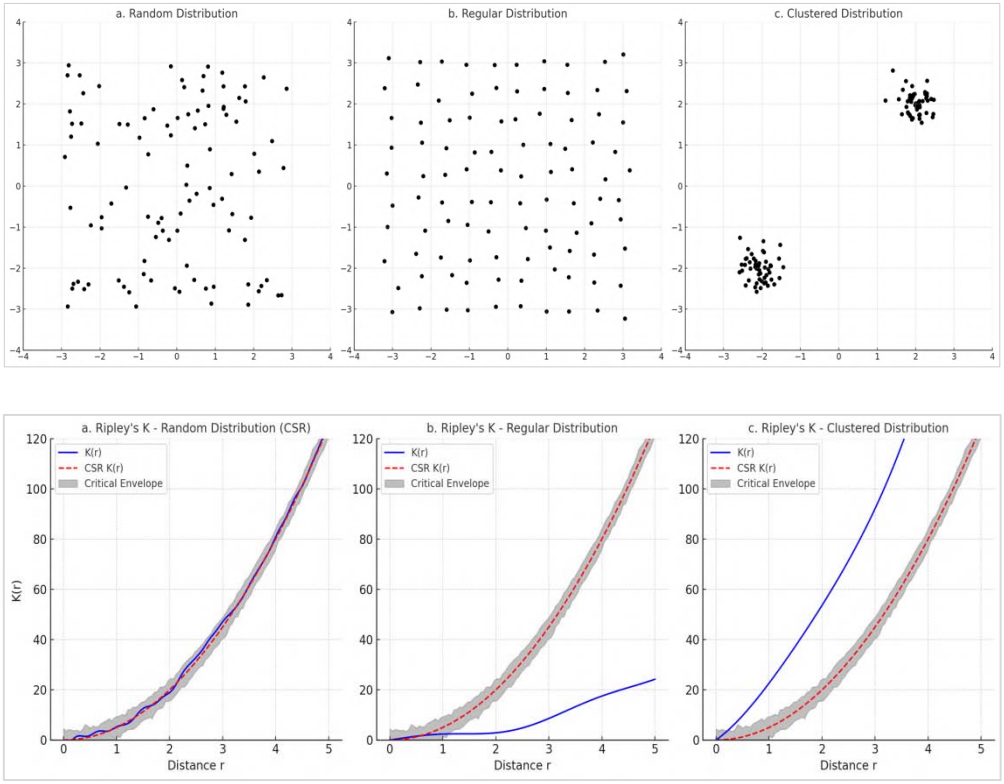


Figura 4.2. (*Arriba*) Tres distribuciones de puntos hipotéticas: (a) aleatoria; (b) regular; (c) agrupada. (*Abajo*) Como cada una de esas distribuciones simuladas se manifiesta en la curva de la función *K* de Ripley.

Para examinar si la distribución de los sitios arqueológicos se desviaba de la CSR, aplicamos la función *K* de Ripley (Ripley, 1977; Baddeley, Rubak *&* Turner, 2015; Bevan, 2020; Rodríguez-Corral *&* Rodríguez-Rellán, 2023). Esta prueba estadística multiescalar está diseñada para identificar patrones de agregación y segregación en comparación con una distribución de puntos aleatoria a diferentes escalas espaciales (Olaya, 2016; Connolly *&* Lake, 2009:

223). Este análisis implica calcular el número esperado de localizaciones de sitios (puntos) dentro de una distancia específica alrededor de cada uno de ellos y luego comparar este número con un conjunto de puntos simulados, cada uno del mismo tamaño que el conjunto de sitios reales (el mismo número de puntos) pero distribuidos de forma aleatoria por toda el área de estudio. Al repetir este proceso un número significativo de veces (normalmente 999), se genera una distribución de referencia que permite hacer inferencias estadísticas sobre si la distribución observada de los sitios es aleatoria o presenta algún patrón significativo (Rodríguez-Corral & Rodríguez-Rellán, 2023: 6). El resultado de esta prueba se interpreta a través de la curva de la función *K*. Si la curva se sitúa consistentemente por encima del "intervalo de aceptación" (*critical envelope*) —i.e., rango que representa el comportamiento esperado de la función *K* en un escenario de aleatoriedad espacial completa (CSR)—, esto sugiere una agrupación o dependencia espacial significativa entre los sitios. Si la curva se encuentra por debajo, indica una distribución más regular o dispersa, mientras que una curva dentro del intervalo de aceptación refleja una distribución aleatoria, es decir, un escenario de CSR (Figura 4.2).

Test de Hopkins-Skellam

Para contrastar y validar los resultados obtenidos en el análisis de distribución espacial de los sitios arqueológicos, de manera complementaria se realizó la prueba de Hopkins-Skellam (1948). Este test proporciona una evidencia estadística adicional para evaluar si existe una tendencia a la agrupación de los sitios arqueológicos, al calcular la distribución espacial observada y compararla de nuevo con 999 conjuntos de puntos simulados distribuidos aleatoriamente por toda el área de estudio (Baddeley, Rubak &

Turner, 2015; Rodríguez-Corral & Rodríguez-Rellán, 2023: 7). Una ventaja significativa de esta prueba es su menor sensibilidad a limitaciones como el efecto borde —i.e., en análisis espacial es muy común la perdida de información hacía los límites del área de estudio, lo que puede sesgar los resultados— o la falta de homogeneidad espacial, en comparación con otras pruebas estadísticas. En este sentido, la prueba produce dos resultados principales: un índice *(A)* y un *p*-valor (valor de probabilidad). Si *A* es igual a 1, la distribución de nuestro conjunto de puntos debe considerarse aleatoria, sin tendencia aparente hacia la agrupación; si *A* es menor a 1, la distribución será agrupada, es decir, los sitios tienden a estar cerca unos de otros; y si es mayor a 1, la distribución será regular o dispersa, mostrando una tendencia a evitarse entre sí (Rodríguez-Corral & Rodríguez-Rellán, 2023: 7). El *p*-valor, por otro lado, proporciona una medida de la significancia estadística del resultado, ayudando a determinar si la observación del índice *A* es significativa o si podría haberse producido por azar. Un *p*-valor bajo refuerza la confianza en que el patrón observado no es aleatorio.

Análisis de Percolación

Los procedimientos aplicados hasta este momento permitieron identificar e interpretar relaciones espaciales, ayudando a detectar patrones de agrupación o dispersión, y proporcionando una comprensión más detallada de cómo se distribuyen los sitios arqueológicos en las regiones estudiadas. Sin embargo, el objetivo era ir más allá, profundizando en cuestiones históricas específicas relacionadas con patrones de asentamiento, dinámicas de poblamiento y conectividad en estas regiones. Por ello, el siguiente paso se centró en examinar el papel específico de los asentamientos y cómo estos se conectan entre sí a través del entorno natural.

Para avanzar en la comprensión de las relaciones espaciales entre estos antiguos asentamientos, se aplicaron análisis de percolación (Maddison, 2020; Maddison *&* Schmidt, 2020). Este método permite describir cómo estos asentamientos se agrupan espacialmente en el paisaje y cómo interactúan entre sí, revelando posibles patrones y comportamientos en su distribución. Originalmente desarrollado en el ámbito de la física y adoptado más recientemente por otras disciplinas, incluida la arqueología, este enfoque permite identificar agrupaciones o *clusters* basados puramente en relaciones espaciales utilizando la distancia euclidiana —i.e., medida geométrica utilizada para calcular la distancia directa entre dos puntos en un espacio plano (Maddison, 2020). En este contexto, una agrupación o *cluster* se determina en función de un umbral de distancia definido previamente; de modo que cualquier punto (asentamiento) cuyos vecinos se encuentren dentro de este umbral formará parte del *cluster*. Este proceso es iterativo, ya que después de identificar los puntos iniciales que forman una agrupación, el análisis se extiende a los vecinos de esos puntos, verificando si cumplen el mismo criterio de proximidad. Si lo hacen, se agregan, y el proceso continúa hasta que no se puedan añadir más puntos (Figura 4.3). De este modo, se identifican agrupaciones de asentamientos que están conectados por relaciones espaciales directas, lo que ayuda a revelar cómo se distribuyen y cómo interactúan entre sí.

Para llevar a cabo la aplicación de este método, se superpuso una cuadrícula o red sobre el área de estudio y se asignó a cada celda un valor que indicaba la probabilidad de contener un asentamiento. Esta técnica permite modelar la distribución espacial de estos elementos y observar cómo se agrupan en función de diferentes escalas. Al aumentar el umbral de probabilidad, se puede observar cómo se forman y expanden las agrupaciones de

asentamientos, permitiendo visualizar cómo estos se conectan y forman agrupaciones cada vez más más grandes a medida que la probabilidad asignada a cada celda aumenta.

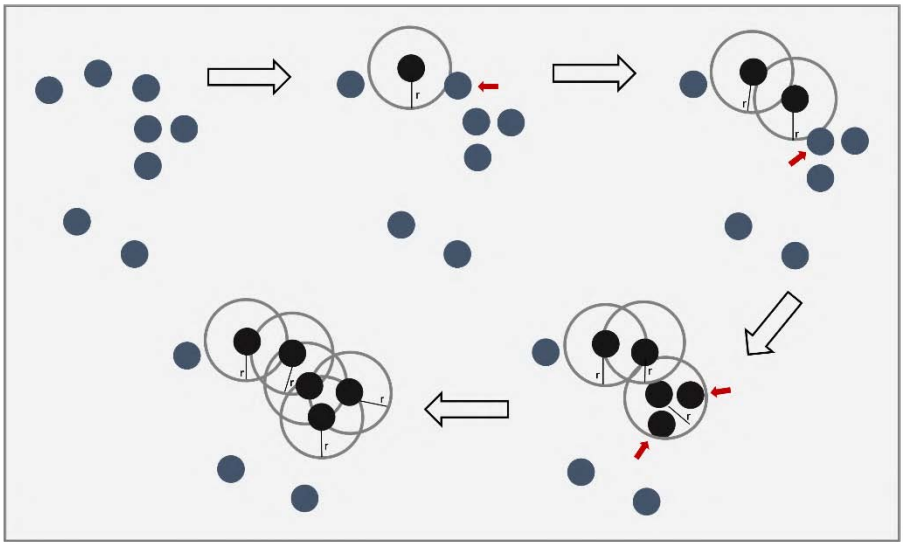


Figura 4.3. Análisis de percolación en un conjunto de puntos simulados. Se traza un radio alrededor de un punto aleatorio; si otro punto cae dentro de ese radio, pasa a formar parte del *cluster*, y se dibuja un nuevo radio alrededor de él y así de manera iterativa hasta que no sea posible integrar más puntos (modificado a partir de Maddison & Schmidt, 2020: 270).

El umbral de percolación es un concepto crítico de este análisis. Este es el punto en el que las agrupaciones o *clusters* de asentamientos se fusionan para formar una red interconectada, lo que refleja un alto nivel de cohesión espacial. Alcanzar este umbral indica que los asentamientos no solo están agrupados, sino que también están interconectados, lo que podría evidenciar redes de interacción y comunicación a lo largo de estos paisajes (Maddison, 2020; Maddison & Schmidt, 2020). Además de identificar el umbral de percolación, estos análisis permiten cuantificar el tamaño y la distribución de los *clusters* formados. Esto incluye la identificación de nodos centrales o zonas pivotales, que juegan un papel clave como "enlaces" en la estructura de la red de asentamientos, proporcionando una visión detallada de la configuración general del paisaje arqueológico.

4.2.2 Correlaciones espaciales entre factores humanos y no humanos

Después de analizar y comprender la estructura general de la red de asentamientos, el siguiente paso fue profundizar en el análisis para entender mejor las pautas de distribución observadas. Este proceso implicaba evaluar y ponderar los patrones espaciales identificados y explorar si estos podían estar influenciados por determinados factores tanto internos como externos. Es decir, establecer si la ubicación de estos asentamientos estaba relacionada con aspectos geográficos, acceso a recursos naturales, actividades socioeconómicas, rutas de transporte, etc. —diversos factores humanos y no humanos. Además, este análisis podía revelar no solo la influencia de factores de manera individualizada, sino también cómo estos podían haberse combinado para condicionar la localización de estos emplazamientos. Si se identificaban correlaciones significativas entre patrones de distribución y factores específicos, se podría inferir cuáles de estos factores y en qué grado desempeñaron un papel crucial en estos procesos. Para ello, se siguió la metodología propuesta por Rodríguez-Corral y Rodríguez-Rellán (2023), quienes proponen una serie de pruebas estadísticas que ofrecen una interpretación más precisa y exhaustiva de las dinámicas coevolutivas entre la evidencia arqueológica y factores tanto antropogénicos como medioambientales.

No obstante, antes de profundizar en el análisis de estos patrones, es esencial considerar una serie de aspectos contextuales específicos de nuestra área de estudio. En primer lugar, cabe destacar cómo las comunidades que habitaron la isla de Creta desarrollaron prácticas socioeconómicas intensivas, aprovechando tanto unas características geográficas y ambientales favorables como la ubicación estratégica de la isla como punto de intersección para

establecer redes que facilitaron las interacciones comerciales y culturales (Cline, 2009; Broodbank, 2010; Tartaron, 2013; Vivas Sainz, 2013; Knapp *&* Demesticha, 2017; Gheorghiade, 2020; entre otros). Por su parte, Marmárica, a pesar de compartir una posición geográfica estratégica, enfrenta condiciones climáticas mucho más adversas, con un entorno caracterizado por paisajes áridos y semiáridos. Por ello, en esta región, la capacidad para gestionar recursos limitados ha marcado la configuración de las prácticas socioeconómicas y las estrategias de subsistencia de las comunidades que la habitaron (Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Nielsen, 2017, 2024; Rieger, 2023; entre otros). Todos estos aspectos dieron lugar a diferentes huellas e impactos en el paisaje, que se reflejan en la evidencia arqueológica documentada. En consecuencia, las zonas históricas de captación de recursos, áreas productivas y las rutas que estructuran e interconectan estos lugares se consideraron factores esenciales para tratar de explicar los patrones y dinámicas de ocupación en estas regiones durante los periodos considerados.

Es importante señalar que inicialmente no se valoraron los lugares de enterramiento como una variable específica en estos análisis. Esta decisión se fundamentó, principalmente, debido a la dificultad de datar con precisión muchos de estos sitios en el caso de Marmárica. Por lo que, con el objetivo de mantener una base metodológica homogénea en ambos estudios de caso, también se decidió excluir esta variable en el análisis de Creta. No debemos olvidar que aún amplias zonas dentro del área de estudio (especialmente en el caso de Marmárica) siguen sin contar con datos arqueológicos de campo, por lo que la naturaleza exploratoria de esta investigación también tiene por objetivo aportar toda la información posible con el propósito de plantear estudios de campo que mejoren la precisión de los datos disponibles.

Por lo tanto, la muestra incluyó la totalidad de la red de asentamientos multiperiodo documentados en ambas regiones (Creta = 1061 / Marmárica = 182), junto con la consideración de las siguientes variables: (a) la densidad (intensidad) de zonas históricas de captación de recursos, principalmente cisternas (solo consideradas en el caso de Marmárica), en la proximidad de los asentamientos, medida en el número de sitios por km² y el coste (en horas) de caminar desde el punto de obtención de agua más cercano; (b) la densidad (intensidad) de lugares productivos en la proximidad de los asentamientos, medida en el número de lugares productivos por km² y el coste (en horas) de caminar desde el lugar productivo más cercano; (c) la densidad (intensidad) de rutas potenciales de tránsito en la proximidad de los asentamientos, medida en el coste (en horas) de caminar desde la ruta más cercana (Rodríguez-Corral *&* Rodríguez-Rellán, 2023: 9).

En cuanto a la primera variable (a), durante la fase de mapeo arqueológico de Marmárica, se identificaron y registraron estructuras de recolección, almacenamiento y gestión de recursos hídricos (principalmente cisternas), como parte de las zonas históricas de captación de recursos (Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Rieger, 2019, 2023; Vetter *&* Rieger, 2019). Es importante destacar que solo se incluyeron aquellas que estaban documentadas en la cartografía histórica o que habían sido datadas mediante trabajos arqueológicos de campo, con el fin de evitar, en la medida de lo posible, la inclusión de estructuras modernas. Además, la aplicación de herramientas de análisis hidrológico fue fundamental para completar el registro de la red hidrográfica de Marmárica, incluyendo ríos, cuerpos de agua y la presencia de *wadis* —i.e., cauces o lechos de ríos secos con potencial inundabilidad estacional.

En relación con la segunda variable (b), durante la fase de mapeo arqueológico también se documentaron diversos tipos de áreas productivas, tales como terrenos agrícolas, zonas de producción, canteras o salinas. El registro de este tipo de evidencia se basó en datos e información obtenidos a través de estudios paleoclimáticos, prospecciones arqueológicas de campo y análisis de sedimentación publicados, los cuales revelan patrones de uso del suelo que datan al menos desde el II milenio a.C. en amplias zonas de las regiones analizadas (Moody, 2000; Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Knapp *&* Manning, 2016; Ghilardi *et al.,* 2019; Embabi, 2020; Goudi, 2022; entre otros).

Por último, la tercera variable (c) se obtuvo mediante la aplicación de análisis de superficie de coste acumulado, específicamente utilizando el método de redes de movilidad focal (*Focal Mobility Network*, FMN), o también conocido como Modelo de Acumulación de Desplazamiento Óptimo (MADO) (Fábrega-Álvarez, 2006; Llobera, Fábrega-Álvarez, *&* Parcero-Oubiña 2011; Déderix, 2016; Stančo *&* Pažout, 2020; entre otros). Este método implicó el uso de herramientas de análisis hidrológico y de coste-distancia, para identificar rutas o corredores naturales con mayor potencial de movilidad (véase Cap. V, 5.2 Técnicas de (Re)construcción de Redes). Los resultados obtenidos de estos análisis se integraron junto con los datos del registro de las rutas históricas previamente documentadas. Esta integración facilitó la comparación y exploración de cómo los distintos modelos de movilidad se alinean o difieren, proporcionando una comprensión más detallada y completa de las dinámicas y patrones que estas estructuras muestran a lo largo de estas regiones.

Los siguientes pasos consistieron en aplicar métodos estadísticos para cuantificar las asociaciones entre las zonas históricas de captación de recursos, áreas productivas, rutas de tránsito y las ubicaciones de los asentamientos.

Esto se realizó a través del cálculo del grado de correlación espacial para identificar posibles relaciones estadísticamente significativas entre todos estos elementos. Estos análisis, realizados en R versión 4.3.1 (R Core Team, 2023), desempeñaron un papel crucial en la determinación del poder explicativo de cada una de las variables analizadas en relación con los patrones de localización y distribución de los asentamientos históricos de ambas regiones.

Por lo tanto, de manera inicial se calculó la relación entre cada una de las variables consideradas y la totalidad del área de estudio en términos de costes de desplazamiento. Para ello, se utilizó el algoritmo *r.walk* en GRASS GIS para generar superficies de costes anisotrópicas y, posteriormente, se convirtieron los resultados de segundos a horas para facilitar la interpretación de los costes en términos más comprensibles de tiempo de desplazamiento. Esto implicó modelar la dificultad al desplazarse a través del área de estudio teniendo en cuenta determinados factores contextuales relacionados con el entorno, lo que hace que el desplazamiento no sea uniforme en todas las direcciones (anisotropía). De este modo, se evaluaron la relación de estas variables con las ubicaciones de los asentamientos, empleando varias estrategias que incluyen: (i) costes de caminar desde fuentes de agua (solo en el caso de Marmárica); (ii) costes de caminar desde lugares productivos; (iii) costes de desplazamiento a pie desde rutas y caminos históricos; (iv) costes de caminar desde los corredores obtenidos mediante redes de movilidad focal (FMN). Esto permitió establecer una base sólida para comprender cómo se interrelacionan las distintas variables en función de los patrones de movilidad en las regiones analizadas (Rodríguez-Corral & Rodríguez-Rellán, 2023: 9).

Test de Kolmogorov-Smirnov

Una vez procesadas las distintas variables del análisis, para profundizar en las posibles asociaciones significativas en relación con la distribución de los asentamientos, se implementó el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S, en adelante) (Connolly *&* Lake, 2009; Baddeley, Rubak *&* Turner, 2015; Kvamme, 2020; Carrero-Pazos, 2023). Este test es un método estadístico no paramétrico, utilizado para comparar la distribución observada de los asentamientos con una distribución de puntos aleatoria, con el fin de identificar si la ubicación de estos asentamientos podría estar influenciada por determinados factores (Rodríguez-Corral *&* Rodríguez-Rellán, 2023).

Para evaluar estas posibles interdependencias, se generó un conjunto de puntos simulados de igual tamaño al número de asentamientos reales y se distribuyeron aleatoriamente por toda el área de estudio. Este procedimiento se repitió 999 veces, siguiendo la metodología propuesta por Rodríguez-Corral y Rodríguez-Rellán (2023: 15), con el objetivo de garantizar la robustez del análisis. Posteriormente, se calcularon las distancias entre los asentamientos reales y las variables consideradas, generando distribuciones de frecuencias acumuladas para estas distancias. De manera similar, se calcularon y compararon las distribuciones de frecuencias acumuladas para los puntos simulados. Al comparar estas distribuciones, el test mide si la distribución de los asentamientos reales difiere significativamente de la distribución de los puntos simulados en relación con las variables analizadas, generando un valor *D*. Este valor luego se valida mediante un *p*-valor, que cuantifica la significancia estadística de la diferencia observada (Connolly *&* Lake, 2009: 181; Carrero-Pazos, 2023: 37).

Al aplicar el test K-S, se pueden determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre la distribución de los asentamientos y los valores de las variables analizadas en comparación con puntos ubicados aleatoriamente a lo largo del área de estudio. Si se encuentran diferencias significativas, esto sugeriría que las ubicaciones de los asentamientos no eran aleatorias y que ciertos factores podrían haber influido en la elección de estas ubicaciones. Por otro lado, si no se encuentran diferencias significativas, esto indicaría que las variables analizadas no fueron factores determinantes en la elección de las ubicaciones de los asentamientos, sugiriendo la necesidad de considerar otros factores para explicar los patrones observados (Kvamme, 2020; Rodríguez-Corral *&* Rodríguez-Rellán, 2023: 9).

Test de Berman

Posteriormente, para contrastar y validar los resultados obtenidos, utilizamos dos pruebas estadísticas adicionales, el Z1 y Z2 del test de *Berman* (1986) (Baddeley, Rubak *&* Turner, 2015; Rodríguez-Corral *&* Rodríguez-Rellán, 2023). Este tipo de prueba ayuda a determinar si un patrón espacial observado tiene una estructura subyacente significativa o si, en cambio, podría ser el resultado de un proceso aleatorio. Al comparar patrones y discernir si la disposición de los puntos (asentamientos) tiene una estructura no aleatoria, estas pruebas permiten explorar qué factores y con qué grado de significación influyen en la distribución espacial.

Como resultado, el test genera dos valores (Z1 y Z2), que son indicadores estadísticos que ayudan a identificar relaciones significativas entre las variables consideradas y la distribución de los asentamientos. Si los valores son significativos, se puede inferir que la variable analizada tiene un impacto

real en la ubicación de los asentamientos, lo que sugiere que la distribución observada no es aleatoria y que está influenciada por factores específicos. Si los valores no son significativos, esto indica que la variable en cuestión puede no tener un efecto condicionante en la distribución de los asentamientos, sugiriendo que otros factores podrían ser responsables de los patrones espaciales observados. Por tanto, el uso conjunto de los valores Z1 y Z2 proporciona una evaluación estadística adicional sobre la estructura espacial observada, lo que ayuda a confirmar relaciones significativas entre las variables y la localización de los asentamientos. Esto es crucial para comprender las razones detrás de los patrones espaciales mostrados por los asentamientos y cómo se relacionan con el entorno.

Receiver Operating Characteristic Curve (ROC)

Finalmente, el último paso consistió en determinar gráfica y estadísticamente el poder discriminatorio de las diferentes variables en función de los resultados de las pruebas descritas anteriormente. Esto se exploró utilizando las pruebas de *Receiver Operating Characteristic Curve* (ROC) y *Area Under the Curve* (AUC) (Baddeley, Rubak *&* Turner, 2015; Rodríguez-Corral *&* Rodríguez-Rellán, 2023). En cuanto a la primera (ROC), esta se emplea para determinar el poder discriminatorio de diferentes variables en función de cómo estas variables afectan a la correcta identificación de ubicaciones con y sin asentamientos.

Como resultado, se genera un gráfico para cada variable que podría influir en la ubicación de los asentamientos, donde la curva ROC representa cómo varía la Tasa de Verdaderos Positivos (TPR) en comparación con la Tasa de Falsos Positivos (FPR) al ajustar diferentes umbrales de decisión del modelo. Una

curva ROC que se acerca al punto superior izquierdo del gráfico indica que la variable tiene un buen poder discriminatorio, es decir, alta sensibilidad y baja tasa de falsos positivos. Esto sugiere que la variable es eficaz para diferenciar entre ubicaciones con y sin asentamientos. Si la curva ROC se aproxima a la diagonal del gráfico, entonces indicaría que la variable no tiene poder discriminatorio, es decir, su capacidad para distinguir entre ubicaciones con y sin asentamientos es casi aleatoria. En esencia, el análisis ROC permite identificar qué variables son más significativas para predecir la distribución espacial de los asentamientos.

Area Under the Curve (AUC)

Por su parte, el AUC es una métrica que proporciona un valor numérico único para resumir el rendimiento general de una variable en términos de su capacidad para discriminar entre diferentes clases, en este caso, entre ubicaciones con y sin asentamientos. El AUC, que se calcula a partir de la curva ROC, se expresa como un índice numérico entre 0 y 1, y es una herramienta eficiente para evaluar la fuerza discriminatoria de cada variable. Un AUC cercano a 1 indica que la variable es altamente efectiva para discriminar entre ubicaciones con y sin asentamientos. Por el contrario, un AUC cercano a 0 sugiere que la variable discrimina incorrectamente entre las ubicaciones, identificando erróneamente las áreas con asentamientos. Finalmente, un AUC cercano a 0.5 sugiere que la variable no tiene ningún poder discriminatorio, lo que implica que no es útil para predecir la ubicación de los asentamientos (Rodríguez-Corral & Rodríguez-Rellán, 2023: 15).

4.3 MODELO PREDICTIVO

4.3.1 Redes Bayesianas

Como se destacó en el capítulo anterior, el patrimonio de estas regiones enfrenta continuas amenazas derivadas tanto de causas antropogénicas (p. ej., el desarrollo urbano, la expansión agrícola, la construcción de carreteras, etc.) como medioambientales (p. ej., la erosión natural, la salinidad del suelo, alteraciones en la línea de costa, etc.), lo que llevó a integrar en este estudio, de forma complementaria a los objetivos iniciales, una evaluación exhaustiva de los riesgos potenciales a los que están expuestos estos sitios arqueológicos (véase Cap. III, *Evaluación de riesgos*). Este hecho es especialmente significativo en el caso de Marmárica, donde la aridez generalizada influenciada por los vientos del sur y los procesos de erosión, junto con el desarrollo urbano y agrícola intensivo en las zonas septentrionales, han creado un entorno particularmente desfavorable para la conservación del patrimonio arqueológico (Laguna-Palma, Toscano, & Rodríguez-Rellán, 2023, 2024; Laguna-Palma, Palacios & Mokránová, 2024).

Ante este desafío, están surgiendo nuevas iniciativas para la documentación y conservación de estos lugares (en primera línea se encuentran proyectos como EAMENA – *Endangered Archaeology in the Middle East and North Africa*, https://eamena.org/; MAREA – *Maritime Endangered Archaeology*, https://marea.soton.ac.uk/; o MAEASaM – *Mapping Africa's Endangered Archaeological Sites and Monuments*, https://maeasam.org/). Así, los actuales marcos de investigación centrados en el riesgo del patrimonio de estas regiones incorporan una amplia variedad de enfoques y aproximaciones. Estas incluyen la identificación y el registro mediante análisis geoespacial (p. ej., Rayne *et al.*, 2017, sobre el uso de imágenes satélite para analizar las

condiciones de los sitios, considerando parámetros como las actividades agrícolas modernas), así como métodos basados en estudios de campo (p. ej., Nikolaus, Mohamed & Emrage, 2022, que incorporan prospecciones a lo largo de la costa para documentar el patrimonio marítimo en peligro en Libia). Otros ejemplos integran la evaluación de daños y amenazas causados por conflictos contemporáneos (p. ej., Di Lernia & Gallinaro, 2014, también sobre el patrimonio de Libia), el cambio climático (p. ej., Vousdoukas *et al.*, 2022, sobre las alteraciones provocadas por la aceleración del cambio climático, como el aumento del nivel del mar y sus impactos en los sitios costeros africanos), o las acciones inducidas por las actividades humanas (p. ej., la expansión agrícola y el desarrollo de infraestructuras, Chirikure, 2013). Estos marcos de investigación contribuyen significativamente a formular respuestas ante la situación de riesgo que enfrentan estos lugares. Sin embargo, el complejo entorno sociopolítico, económico y medioambiental de estas regiones dificulta aún la concepción y puesta en marcha de iniciativas verdaderamente eficaces para la conservación de este patrimonio.

En este contexto, la modelización computacional, cuyas ventajas se han expuesto a lo largo de este capítulo, sigue siendo una vía poco explorada. En particular, los métodos de aprendizaje automático, por ejemplo, solo han sido aplicados recientemente para investigar cuestiones relativas a la gestión del patrimonio. No obstante, la diversidad de sus aplicaciones, que van desde la supervisión de la salud estructural de edificios patrimoniales (Mishra, 2021) hasta la exploración de la vulnerabilidad de sitios arqueológicos bajo amenaza (Saha *et al.*, 2021), demuestra claramente el potencial de este tipo de aproximaciones para apoyar la evaluación y la creación de estrategias de preservación eficaces sobre el patrimonio en peligro en diversos contextos geográficos y ambientales.

Este hecho impulsó, en el marco de esta investigación, a desarrollar de manera exploratoria un modelo predictivo basado en la aplicación de un algoritmo de aprendizaje automático (*machine learning*) (Moschovakis, 2001; Franzese, Hays & Kachi, 2012), que tuviera en cuenta las especificidades de las diferentes condiciones antropogénicas y medioambientales y sus posibles impactos en el patrimonio de la región de Marmárica. La decisión de centrar este estudio exploratorio inicialmente en esta región se fundamentó en que, durante el proceso de mapeo arqueológico, se detectó un mayor grado de deterioro y destrucción en los sitios documentados de este caso en comparación con otras áreas. Además, este enfoque permitía contrastar y validar de manera cuantitativa las evaluaciones cualitativas iniciales realizadas sobre los riesgos potenciales registrados. Un beneficio adicional de este estudio radica en que, si el modelo predictivo demostraba ser efectivo, podría ser adaptado y aplicado a otros casos. Esto abriría la posibilidad de utilizarlo en la gestión del patrimonio en diferentes regiones y bajo diversos contextos.

Por lo tanto, el planteamiento consistió en desarrollar un modelo predictivo de evaluación de riesgos basado en medidas probabilísticas, integrando información proveniente de diversas fuentes de evidencia, como registros documentales y arqueológicos, fotografías aéreas históricas e imágenes satélite, junto con datos de tipo geográfico y ambiental. En concreto, evaluar si los factores abióticos, como la ubicación, clima, tipo de suelo, agua, aridez, etc. y los factores antropogénicos, como la presencia de zonas urbanas, terrenos agrícolas, infraestructuras de transporte, etc. influyen en la probabilidad de supervivencia o desaparición de los sitios arqueológicos. A partir de estas consideraciones, se establecieron una serie de preguntas de investigación para guiar el análisis y asegurar que el modelo abordara de manera efectiva las cuestiones planteadas:

- ¿Existe una relación significativa entre los factores medioambientales y antropogénicos y la conservación del patrimonio arqueológico en el noreste de África?
- ¿En qué medida influyen estos factores en la supervivencia de los sitios arqueológicos?
- ¿Cómo afectan las diferentes combinaciones de factores medioambientales y antropogénicos en la supervivencia o degradación de los sitios arqueológicos?
- ¿Cuál es la probabilidad de supervivencia de los sitios arqueológicos, y cómo varía en función de la influencia de diversos factores?

Al responder estas preguntas, se pretendía demostrar cómo la modelización predictiva no solo tiene el potencial de generar resultados efectivos para abordar cuestiones históricas, sino también para enfrentar desafíos actuales. Ya que esto podría ayudar al desarrollo de estrategias preventivas adecuadas para salvaguardar el patrimonio arqueológico de estos lugares.

Para afrontar este reto, de entre los diversos métodos computacionales y algoritmos de aprendizaje automático disponibles, se optó por aplicar un modelo probabilístico basado en redes bayesianas (Franzese, Hays, *&* Kachi 2012; Moschovakis 2001; Palacios, 2023a, 2023b). A pesar de que las redes bayesianas han cobrado una importancia significativa en el estudio de los sistemas socionaturales, especialmente para predecir su evolución ante el cambio (Léger *et al.,* 2006; Bernabeu Aubán, Moreno Martín *&* Barton, 2012; Keshtkar *et al.,* 2013; Merritt *et al.,* 2016; Sperotto *et al.,* 2017; Khan *et al.,* 2018; Pan *et al.,* 2019; Ropero *et al.,* 2021; entre otros), su aplicación en arqueología sigue siendo relativamente reciente (Mishra, 2021; Saha *et al.,* 2021; Palacios *et al.,* 2022; Palacios, 2023a, 2023b). Este enfoque, dentro del aprendizaje automático supervisado (*machine learning*), consiste en la generación de

modelos gráficos predictivos utilizando inferencia probabilística (Koller & Friedman, 2009). Similar a otros métodos estadísticos, estos algoritmos están diseñados para representar gráficamente relaciones de dependencia entre distintas variables; sin embargo, en este caso, también permiten realizar inferencias más allá de la simple descripción de los datos (Nagarajan *et al.*, 2013). De esta manera, es posible realizar preguntas al modelo, lo que se conoce como "consulta" y obtener respuestas mediante "razonamiento probabilístico". Las respuestas proporcionadas por el modelo se obtienen a través de un proceso que utiliza las probabilidades condicionadas para calcular ciertos eventos o condiciones en función de la evidencia observada (Palacios, 2023b: 35).

Para explorar todo este proceso, las redes bayesianas se visualizan mediante una estructura gráfica compuesta por nodos, que representan variables cuyos valores pueden cambiar bajo diferentes condiciones, y enlaces que muestran las relaciones directas entre estas variables (Koller & Friedman, 2009). Un aspecto fundamental de este enfoque es que, a diferencia de muchos otros métodos de aprendizaje automático, estos modelos se consideran de "caja blanca" (*white box*), lo que significa que todos los parámetros y predicciones generados por el modelo son observables, por lo que el proceso predictivo es transparente (Naïm *et al.*, 2011; Palacios, 2023b). Este atributo es especialmente valioso en el contexto de la investigación, ya que facilita no solo la interpretación y verificación de los resultados obtenidos, sino también su replicabilidad y validez. Además, al permitir un análisis detallado de cómo el modelo procesa la información y genera sus predicciones, este enfoque incrementa la confianza en los resultados, aportando una mayor solidez.

4.3.2 Pre-procesamiento de Datos

Al explorar el formato y estructura de los modelos de datos, se destacó que una de sus principales cualidades era su apertura (véase Cap. III, 3.2.3 *Gazetteer* de sitios arqueológicos y 3.2.4 *Gazetteer* de rutas históricas). Esto significa que los modelos están diseñados para poder modificarse o ampliarse según las necesidades específicas de la investigación. De igual modo, también se destacó como los modelos de aprendizaje automático (*machine learning*) emplean algoritmos capaces de analizar grandes volúmenes de datos y construir modelos predictivos a partir de ellos, aumentando su capacidad de predicción a medida que se añaden más datos. En este contexto, dado que el objetivo era evaluar cómo diversos factores, relacionados tanto con las actividades humanas como con las condiciones medioambientales, contribuyen a la degradación y desaparición de los sitios arqueológicos, era fundamental incluir en el modelo todas las variables que pudieran haber potencialmente influido durante estos procesos (Figura 4.4). Para ello, se recurrió a datos e información proporcionados por portales oficiales reconocidos como las capas globales de clasificación de la cubierta terrestre del proyecto CORINE (CLC) y *Sentinel-2*, así como modelos digitales de elevación (SRTM 1, 30 m) y datos climáticos de los portales GAEZ (*Global Agro-Ecological Zones*) y *WorldClim* (véase Cap. III, 3.2.1 Fuentes, Recursos y Datos, Tabla 3.1).

Una vez obtenidos todos estos datos, las variables consideradas específicamente en este análisis se clasificaron de forma heterárquica en cuatro categorías: *Site Description* (Descripción del sitio), *Location* (Ubicación), *Climate* (Clima) y *Soil* (Suelo) (Tabla 4.1). En primer lugar, la categoría "Descripción del sitio" define la naturaleza y su tipología, si existen restos

documentados y si ha sobrevivido a lo largo del tiempo. En segundo lugar, la categoría "Ubicación" describe la localización geográfica, incluidas características topográficas y la distancia a elementos significativos como la costa, *wadis*, cuerpos de agua e infraestructuras contemporáneas como ciudades, carreteras, etc. (Mojaddadi *et al.*, 2017; Nitya *et al.*, 2020). En tercer lugar, la categoría "Clima" se refiere a variables como la temperatura, la precipitación y su variabilidad, ya que los cambios bruscos en estos valores pueden provocar sequías, erosión, etc. (Nitya *et al.*, 2020; Westley *et al.*, 2021; Kreibich *et al.*, 2022). Por último, la categoría definida como "Suelo", engloba variables que van desde la composición geológica hasta el tipo de cobertura del terreno (Mojaddadi *et al.*, 2017; Saha *et al.*, 2021).

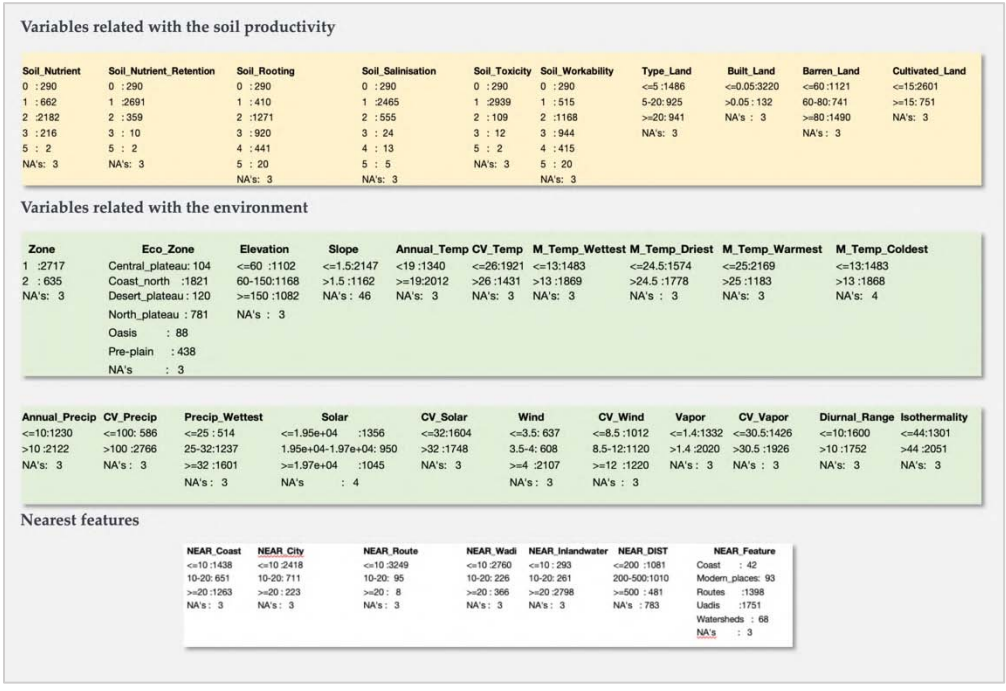


Figura 4.4. El proceso implicó integrar nuevas variables de diferentes series temporales relacionadas con el tipo de suelo, las condiciones ambientales y la cercanía a estructuras contemporáneas.

Tabla 4.1. Variables empleadas en el modelo divididas en cuatro categorías relacionadas con la descripción del lugar, la ubicación, el clima y las características del suelo.

SITE DESCRIPTION	LOCATION	CLIMATE	SOIL
Remains	Zone	Annual mean temperature	Soil nutrient
Survival	Eco zone	Coefficient of variation annual mean temperature	Soil nutrient retention
Type	Elevation	Annual mean precipitation	Soil rooting
	Slope	Coefficient of variation annual mean precipitation	Soil salinisation
	Nearest coast		Soil toxicity
	Nearest city		Soil workability
	Nearest route		Type of land
	Nearest wadi		Built land
	Nearest inland water		Barren land
	Distance to nearest feature		Cultivated land
	Nearest feature		

Una vez estructurados todos estos datos e información asociados a los sitios documentados, procesamos el conjunto de variables seleccionadas mediante análisis computacional en R (R Core Team, 2023). Posteriormente, los valores cuantitativos se discretizaron en intervalos uniformes utilizando la función *discretize* del paquete *arules* en R (Hahsler, Grün *&* Hornik 2005), lo que permitió que los datos fueran más manejables al momento de construir el modelo predictivo (véase Laguna-Palma, Palacios *&* Mokránová, 2024, para consultar el conjunto de datos completo, con todas las fuentes, variables consideradas y el código empleado).

4.3.3 Construcción del Modelo

El proceso de modelización implica la creación de representaciones simplificadas de la realidad, diseñadas para facilitar una mejor comprensión de los fenómenos o sistemas a analizar (Frigg & Nguyen, 2017). Para producir estos modelos, se parte de dos conceptos principales: deducción e inducción. El primero sigue un enfoque descendente donde se parte de premisas generales para llegar a conclusiones específicas, a partir de los datos disponibles. Esto es especialmente útil en arqueología porque permite inferir patrones y estructuras a partir de evidencias empíricas, incluso si estas son fragmentarias. Sin embargo, una de las limitaciones es que asume que las conclusiones son "ciertas", lo que puede ser problemático si las premisas no son completamente válidas o si hay limitaciones en la capacidad de validar los resultados (Coccia, 2018: 119). El segundo, en cambio, se basa en un enfoque ascendente, donde se parte de datos específicos para desarrollar teorías generales. Este enfoque es particularmente útil cuando se trabaja con datos que no pueden ser tratados de manera determinista, ya que los resultados se expresan en términos de probabilidad lo que proporciona flexibilidad en la interpretación y la validación de los modelos (Lammers-Keijsers, 2005; Gärdenfors *&* Stephens 2018; Barker, 2020).

En el caso específico de la construcción de modelos probabilísticos basados en redes bayesianas dentro del aprendizaje automático, es importante señalar que implican un proceso complejo dividido en varias fases. Estas etapas abarcan desde la creación de la base de datos y el procesamiento de los datos hasta el diseño, validación y, finalmente, la aplicación del modelo con el que obtener resultados que puedan ser interpretados (Palacios, 2023a, 2023b). En este sentido, el proceso comienza con la definición del sistema a modelar,

identificando las variables clave y las relaciones entre ellas. Esto requiere una comprensión profunda y detallada tanto de los datos como de las hipótesis que sustentan el comportamiento del sistema a analizar. Entre estas variables, se deben identificar tanto las entradas (*inputs*) —i.e., los parámetros, condiciones iniciales, suposiciones y restricciones que definen el sistema— como las salidas (*outputs*) —i.e., las respuestas o resultados que el modelo pretende predecir (Mitchell, 2009).

Los siguientes pasos consisten en la propia configuración del modelo, el cual se basa en identificar las relaciones más probables entre distintas variables. Estas relaciones se determinan analizando los datos disponibles y ajustando los coeficientes de las conexiones (enlaces) entre las variables de la red, un proceso conocido como aprendizaje de parámetros (Palacios, 2023b). Así, las redes bayesianas permiten inferir información "desconocida" a partir de información "conocida" registrada en el modelo. Es decir, utilizando los datos disponibles, el modelo puede estimar información aún no disponible, basándose en las probabilidades calculadas a partir de las relaciones establecidas entre las variables consideradas. En el contexto de este estudio, el modelo se utilizó para inferir la probabilidad de supervivencia de los sitios arqueológicos, en función de la información recopilada sobre otros sitios similares ya documentados. De este modo, el modelo podía proporcionar una estimación fundamentada sobre la probabilidad de que un sitio sobreviva o no, utilizando patrones ya conocidos en otros casos.

Por lo tanto, una de las primeras tareas consistió en organizar las variables del conjunto de datos en dos categorías: salidas (lo que se quería predecir) y entradas (lo que se utilizó para hacer las predicciones). Como el objetivo era predecir la probabilidad de supervivencia de los sitios bajo ciertas

condiciones, la variable de salida del modelo se denominó "Supervivencia" (*Survival)*. Por otro lado, el resto de variables disponibles en el conjunto de datos (factores ambientales, antropogénicos y geográficos) se utilizaron como entradas en el modelo, ya que estas servirían como base para realizar las predicciones sobre la supervivencia de los sitios.

Para llevar a cabo este proceso, se empleó el paquete de R *bnlearn* (Scutari *&* Denis, 2021), junto con la función *hc* (*hill-climbing*) para aprender la estructura de la red, y *gRain* para realizar las predicciones basadas en la red construida (Højsgaard *et al*., 2012). En relación al aprendizaje de la estructura del modelo, aplicamos dos algoritmos diferentes: *Naïve Bayes* (NB, en adelante), y *Augmented Naïve Bayes* (ANB, en adelante) (Palacios, 2023b). En el primero (NB), la estructura se asemeja a un árbol en el que la variable de salida está conectada directamente con todas las variables de entrada. Sin embargo, una de sus limitaciones es que asume que las variables de entrada son independientes entre sí, —i.e., no hay relaciones directas entre ellas—, lo que puede no ser realista en situaciones donde las variables están correlacionadas. Para superar esta limitación, el segundo (ANB), en cambio, permite interrelaciones entre las entradas ya que considera que un modelo no se construye en sentido lineal, lo que hace que este sea más flexible y capaz de capturar relaciones más complejas.

A pesar de estas diferencias, se construyeron ambos modelos (NB y ANB) y se aplicó un método de validación cruzada conocido como *k-fold* ($k = 20$), con el que evaluar la precisión estadística del rendimiento de los dos (Duda *&* Hart, 1973). En esta prueba, el conjunto de datos completo se divide en 20 subconjuntos. En cada iteración, 19 de estos subconjuntos se utilizan para entrenar el modelo —i.e., para enseñarle a reconocer patrones en los datos—

mientras que el restante se utiliza como prueba para evaluar la precisión del modelo, comprobando su capacidad para hacer predicciones sobre datos nuevos no conocidos. Este proceso se repite 20 veces, cambiando en cada ocasión el subconjunto utilizado para la prueba y aquellos empleados para el entrenamiento. Como resultado, se obtienen 20 estimaciones diferentes de la precisión del modelo, lo que proporciona una evaluación más robusta de su rendimiento. Este procedimiento de validación es una práctica estándar en todas las metodologías de aprendizaje automático.

Posteriormente, se compararon ambos modelos utilizando la prueba de Shapiro-Wilk (1965), para determinar si mostraban diferencias significativas en cuanto a su precisión (Palacios, 2023b). Al no encontrarse diferencias estadísticamente significativas, ambos modelos fueron considerados igualmente precisos. Sin embargo, se optó por el modelo ANB debido a su capacidad para modelar y revelar las relaciones complejas entre las diferentes variables, lo que permite una mejor comprensión de cómo se configuran y relacionan dentro del modelo. Además, para cuantificar la fuerza de las relaciones probabilísticas entre las variables, se utilizó la función *arc.strength* del paquete de software *bnlearn* (Palacios, 2023b). Esta herramienta sirve para identificar y cuantificar la solidez de las conexiones entre las diferentes variables en el modelo. Esta función genera un *p*-valor para cada par de variables, donde este valor indica si existen relaciones significativas entre ellas. A partir de estos cálculos, es posible evaluar las relaciones entre las variables de entrada (*inputs*) y salida (*outputs*) en el modelo bayesiano, determinando cuáles son estadísticamente significativas, es decir, aquellas relaciones que no se deben al azar, lo que se evalúa mediante el *p*-valor.

Como resultado, las relaciones se representan visualmente mediante grafos dirigidos acíclicos (DAGs), lo que significa que la red muestra relaciones en las que no es posible comenzar en un nodo y, siguiendo la dirección de los enlaces, regresar al mismo nodo. Esta estructura es común en modelos de causalidad y redes bayesianas, en donde la dirección del enlace representa relaciones de influencia. Por tanto, estos modelos permiten representar de forma explícita las dependencias directas entre variables, lo cual facilita su análisis y comprensión, garantizando que la red represente relaciones de influencia de manera coherente y sin contradicciones internas (Palacios, 2023b). Una vez que el modelo está construido, no solo es posible comprender las relaciones existentes entre las variables, sino también utilizarlo para hacer predicciones. Esto significa que, una vez entrenado, el modelo es capaz de prever cómo se comportarían los *outputs* (variables de salida) en función de diferentes valores de los *inputs* (variables de entrada), incluso en escenarios que no están presentes en la base de datos original utilizada para su entrenamiento.

Esta capacidad predictiva tiene un valor estratégico clave para la planificación y conservación del patrimonio arqueológico, ya que la toma de decisiones en este ámbito debe enfrentar la incertidumbre sobre cómo diversos factores pueden impactar en estos lugares a lo largo del tiempo. Mediante estas aproximaciones, es posible anticipar tales escenarios permitiendo evaluar el impacto tanto de factores internos como externos y medir la eficacia de diferentes estrategias de gestión. Al prever cómo las condiciones actuales pueden influir en el estado de conservación de los sitios arqueológicos, los responsables de la toma de decisiones pueden adoptar enfoques fundamentados, optimizando así los recursos disponibles para mitigar el impacto de amenazas potenciales.

4.4 ESTUDIOS DE CASO

4.4.1 Creta (Grecia)

A partir de los análisis sobre la distribución espacial de los sitios arqueológicos documentados en el caso de Creta, los resultados obtenidos han permitido evaluar la estructura general de estos sitios y determinar si siguen patrones aleatorios o si, por el contrario, muestran agrupaciones o asociaciones significativas influenciadas por posibles factores específicos. Para ello, de manera inicial se aplicaron varias pruebas estadísticas, como la estimación de la densidad de Kernel (KDE), para identificar áreas de alta y baja densidad de puntos, en este caso, sitios arqueológicos; la función *K* de Ripley para analizar la distribución espacial de los sitios y detectar posibles patrones de agrupación, dispersión o aleatoriedad; el test de Hopkins-Skellam, para contrastar y validar de forma cuantitativa los resultados obtenidos; y, finalmente, análisis de percolación para explorar las propiedades de conectividad específica entre los antiguos asentamientos. Con base a estos análisis, se identificaron patrones sobre la localización y distribución de los sitios documentados, proporcionando una base sólida para profundizar en la comprensión de las dinámicas espaciales de estos lugares, las cuales se exploran con mayor detalle a continuación.

En primer lugar, el análisis basado en la estimación de densidad de Kernel (KDE) ha proporcionado una visión clara de la variabilidad en la distribución espacial de los sitios registrados a lo largo de la isla de Creta. Como se muestra en la figura 4.5, los resultados revelan una distribución no homogénea, con áreas de alta densidad (representadas en rojo) localizadas principalmente en las zonas central y oriental de la isla, mientras que las áreas de menor densidad (en amarillo) se concentran predominantemente en la parte

occidental, salvo en el área de La Canea. Específicamente, las zonas con mayor concentración de sitios arqueológicos se ubican en la costa sur central al oeste de Mesará, en Heraclión y su periferia, el golfo de Mirabello, La Canea, y el área en torno a la Meseta de Lasithi. Estos resultados sugieren que estas zonas han sido históricamente importantes centros de ocupación y actividad humana, posiblemente influenciadas por factores como la proximidad al mar, la presencia de rutas de comunicación y territorios favorables para el desarrollo de actividades socioeconómicas clave, que podrían haber facilitado e impulsado el desarrollo de estos lugares.

En relación con este último aspecto, las áreas de alta densidad tienden a coincidir con zonas de mayor accesibilidad y abundancia de recursos naturales, como llanuras fértiles o ubicaciones estratégicas vinculadas a rutas o corredores naturales. Esto sugiere, de manera preliminar, una posible relación entre la alta densidad de sitios arqueológicos y territorios con condiciones favorables para el desarrollo agrícola, la comunicación y el intercambio. En contraste, las áreas con menor densidad podrían estar asociadas a zonas de accesibilidad reducida o con recursos naturales más limitados. Sin embargo, estas áreas menos densamente pobladas también podrían haber desempeñado un rol estratégico durante los distintos periodos analizados, lo que indica que las dinámicas de ocupación y los patrones de asentamiento en Creta son más complejos de lo que una simple relación entre accesibilidad y densidad podría sugerir. Por tanto, resulta esencial profundizar en los resultados y patrones observados para comprender mejor los factores y procesos que pudieron haber influido en la configuración y estructuración del paisaje arqueológico de estos lugares.

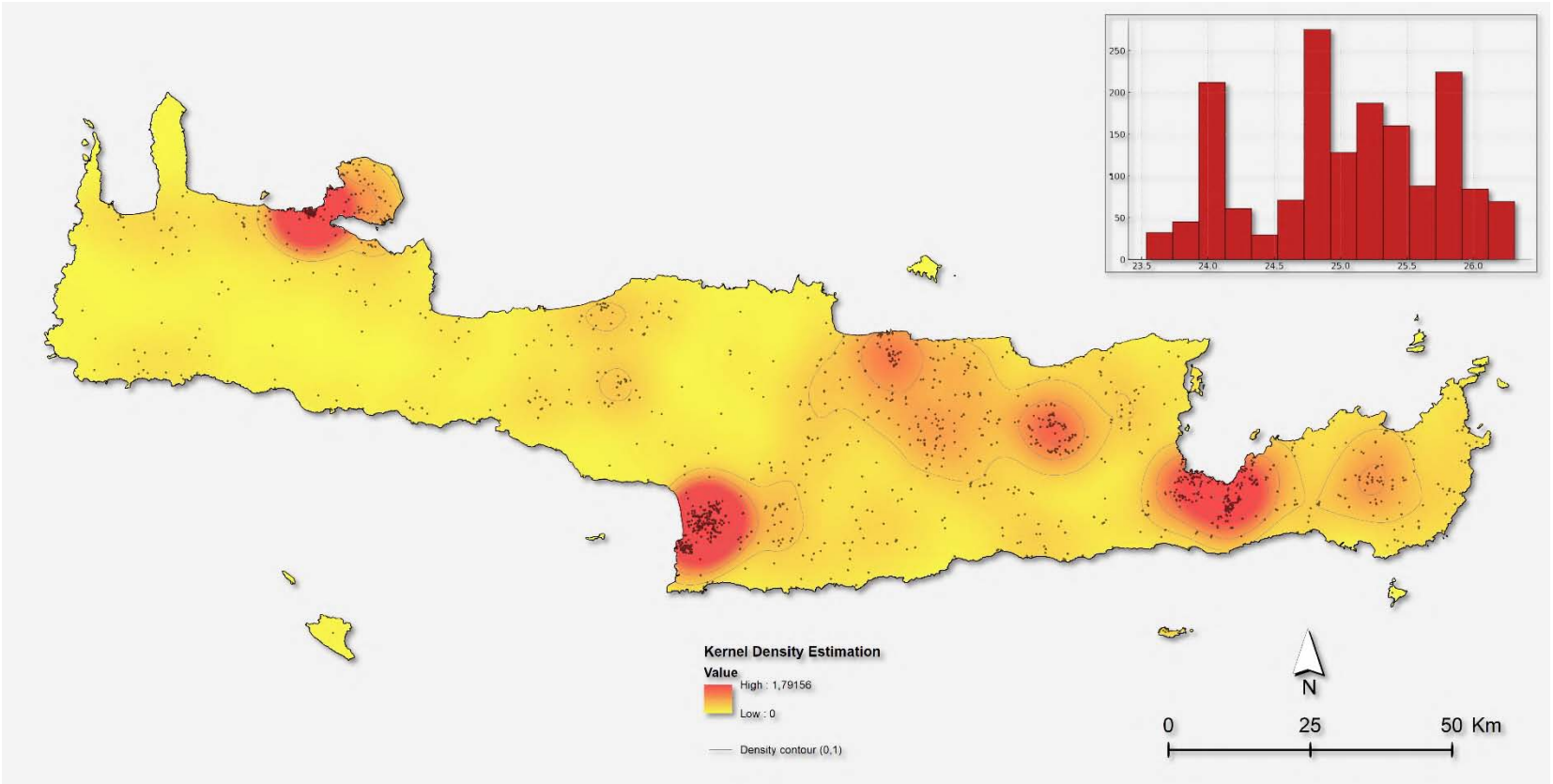


Figura 4.5. Estimación de la densidad de Kernel (KDE) sobre la distribución de los sitios documentados en la isla de Creta. Las áreas de mayor densidad se destacan en colores más intensos (rojo), mientras que las áreas de menor densidad aparecen en tonos más suaves (amarillo), lo que facilita la identificación de patrones y estructuras en la distribución espacial de estos sitios. (*Arriba*) Gráfico que muestra la distribución del número de sitios arqueológicos documentados a lo largo del eje oeste-este, evidenciando una mayor concentración (intensidad) de sitios en las zonas central y oriental de la isla.

El siguiente paso en el análisis consistió en determinar si la distribución espacial de la totalidad de los sitios arqueológicos documentados en la isla (1.665) sigue un patrón agrupado (*cluster*), regular (uniforme) o si, por el contrario, se distribuyen de manera independiente (aleatoria). Establecer si la disposición observada se aparta de un patrón aleatorio era crucial para profundizar en las posibles causas subyacentes que podrían haber influido en estos patrones, incluyendo factores geográficos, ambientales o variables antropogénicas específicas. Para ello, se utilizó la función *K* de Ripley, una prueba estadística que permite comparar la densidad de puntos observada con la densidad esperada bajo la hipótesis de aleatoriedad espacial completa (*Complete Spatial Randomness*, CSR). Este procedimiento se realizó calculando la función *K* a distintas escalas y comparándola con la *K* esperada en un escenario de CSR, posibilitando así identificar desviaciones significativas en la disposición espacial de los sitios arqueológicos, lo que puede reflejar dinámicas espaciales complejas y revelar posibles patrones de organización social a lo largo del tiempo.

A partir de este análisis, los resultados indican que la curva de la función *K* se sitúa consistentemente por encima de la curva esperada en todo el rango de distancias analizado, lo que sugiere un claro patrón de agrupamiento (Figura 4.6). Esto significa que, en lugar de una distribución aleatoria o dispersa, los sitios arqueológicos tienden a agruparse en áreas específicas del paisaje. Además, esta tendencia al agrupamiento presente a distintas escalas sugiere que la estructura de estos asentamientos pudo haber estado influida por dinámicas de interacción complejas, que operaban a diferentes niveles. Tal patrón apunta a la existencia de una estructura interconectada en la región, en la que los sitios desempeñaban un papel estratégico dentro de un sistema espacialmente organizado.

En consecuencia, el análisis de la función *K* de Ripley determina que la distribución espacial de los sitios arqueológicos no sigue un patrón de aleatoriedad espacial completa (CSR), sino que muestra un patrón significativo de agrupamiento. Estos resultados refuerzan la hipótesis de que los sitios arqueológicos en Creta estuvieron organizados y estructurados de manera coherente, probablemente influenciados por diversos factores que moldearon el paisaje a lo largo de los diferentes periodos históricos analizados.

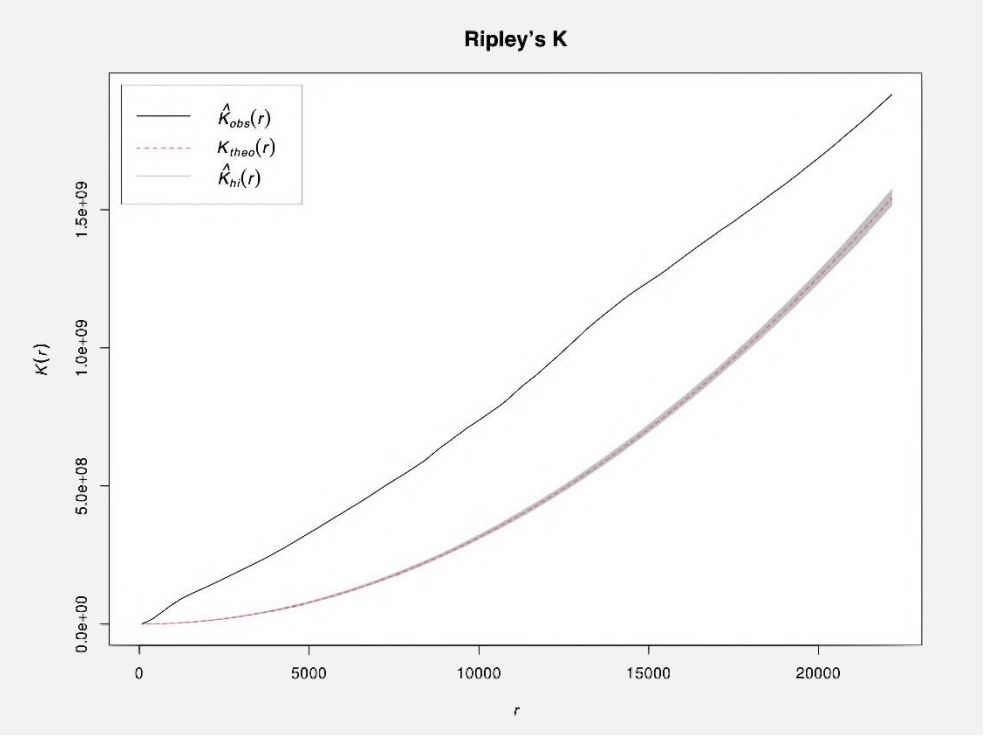


Figura 4.6. Representación gráfica de la distribución de los sitios documentados en Creta mediante la función *K* de Ripley. El eje vertical muestra el número medio acumulativo y estandarizado de puntos (sitios arqueológicos) a diferentes distancias, representada en el eje horizontal. El valor acumulativo de los sitios reales (línea negra) se compara con los 999 conjuntos simulados del mismo tamaño que muestran un escenario de aleatoriedad (CSR) (línea roja discontinua), dentro del "intervalo de aceptación" (franja gris).

Para contrastar estos resultados, se aplicó de manera complementaria el test de Hopkins-Skellam. Esta prueba estadística fue realizada utilizando el mismo conjunto de datos para validar de forma cuantitativa la hipótesis de que los sitios presentan un patrón hacia el agrupamiento, frente a la hipótesis nula de una distribución aleatoria. En este sentido, el valor estadístico de A obtenido fue de 0.22063, lo que indica una clara tendencia hacia la agrupación de los sitios arqueológicos ($A < 1$). Este valor, significativamente inferior a 1, indica que los sitios no están distribuidos de manera aleatoria, sino que se encuentran agrupados en determinadas áreas. Además, el test arrojó un valor p muy bajo (< 2.2e-16), lo que refuerza la significancia estadística del resultado y proporciona evidencia sólida en contra de la hipótesis nula de CSR. Esto implica un alto nivel de confianza en que la distribución de los sitios arqueológicos en Creta no es aleatoria y sigue un patrón espacial de distribución agrupado.

Por lo tanto, estos resultados no solo corroboran los patrones observados mediante la función K, sino que aportan una validación adicional, lo que finalmente permite confirmar que los sitios documentados tienden a concentrarse mayoritariamente en determinadas zonas. Este patrón de agrupación espacial sugiere que la distribución de los asentamientos no fue arbitraria, y que esta fuerte tendencia hacia la agrupación pudo haber estado relacionada tanto por características propias del entorno natural, como por factores relacionados con aspectos socioeconómicos clave, tales como la proximidad a redes de intercambio, rutas comerciales o centros socioculturales. En conjunto, los resultados proporcionan una base cuantitativa sólida para poder profundizar en las condiciones y los factores específicos que pudieron haber influido en la configuración espacial de estas sociedades y los paisajes que habitaron.

Una vez identificado el tipo de distribución que presenta la totalidad de los sitios arqueológicos documentados en el caso de Creta, se aplicaron una serie de métodos estadísticos adicionales centrados específicamente en la distribución mostrada por los antiguos asentamientos. El objetivo al aplicar estos análisis era profundizar en la comprensión de los patrones de asentamiento, dinámicas de poblamiento y la conectividad espacial en estos paisajes a lo largo plazo (diacronía). Entre ellos, el análisis de percolación ha permitido identificar patrones de agrupamiento y conectividad territorial, facilitando la inferencia de redes de interacción y áreas de influencia. Para este análisis, se examinaron las agrupaciones o *clusters* formados a diferentes radios de conexión (escalas), con el propósito de identificar umbrales clave que señalaran cambios significativos en la conectividad entre asentamientos.

En este contexto, los resultados muestran una evolución progresiva en la estructura de los *clusters* a medida que aumenta la escala analizada (Figuras 4.7 y 4.8). En radios menores (2-5 km), la mayoría de los asentamientos conforman pequeños grupos con una conectividad limitada. En cambio, a partir de radios de aproximadamente 6-7 km, el número de *clusters* disminuye de forma notable, mientras que el tamaño de las agrupaciones más grandes crece exponencialmente. Este comportamiento apunta a la formación de redes de interacción, donde asentamientos previamente aislados comienzan a conectarse, creando estructuras más amplias y cohesionadas.

Esta tendencia señala un umbral crítico entre aproximadamente los 8-9 km, donde se produce una fusión significativa de agrupaciones. En este rango, el número de *clusters* disminuye aproximadamente un 40%, mientras que el tamaño del *cluster* más grande experimenta un incremento considerable. Esto revela cómo, a partir de radios superiores a 9 km, la estructura general del

sistema está dominada principalmente por un único componente, con solo algunos *clusters* pequeños remanentes. Esto podría interpretarse como un indicio de la distancia máxima de interacción directa entre los asentamientos. Además, el tamaño promedio de estas agrupaciones también refuerza la idea de coalescencia entre asentamientos a estas escalas. En cambio, en radios menores, el tamaño de las agrupaciones también es menor, reflejando la dispersión de los asentamientos en pequeños grupos aislados. Sin embargo, a partir de un radio de 5 km, el tamaño promedio de los *clusters* comienza a aumentar de manera significativa, alcanzando un valor cercano a 80 asentamientos por *cluster* en un radio de 10 km. Este proceso de aumento progresivo evidencia un patrón de consolidación en las redes de interacción a medida que la distancia entre los asentamientos se incrementa.

De manera similar, se detecta un segundo umbral clave cercano a los 20 km, donde se observa una nueva fase de consolidación. A esta distancia, el nivel de conectividad habría permitido la formación de redes regionales más complejas, facilitando interacciones entre asentamientos que estaban previamente conectados solo a nivel local. En radios superiores, el crecimiento del *cluster* más grande se estabiliza, alcanzando un punto en el que la mayoría de los sitios arqueológicos se encuentran dentro de una única estructura.

Por lo tanto, el umbral de percolación, situado entre los 8-9 km, podría corresponder a la distancia efectiva de interacción entre asentamientos cercanos, donde las dinámicas locales eran más predominantes. En cambio, el umbral de 20 km, podría señalar una fase de integración más amplia, probablemente relacionada con redes regionales. Así, el análisis de percolación ha permitido identificar radios críticos que marcan transiciones en los patrones y conectividad en estos territorios a diferentes escalas.

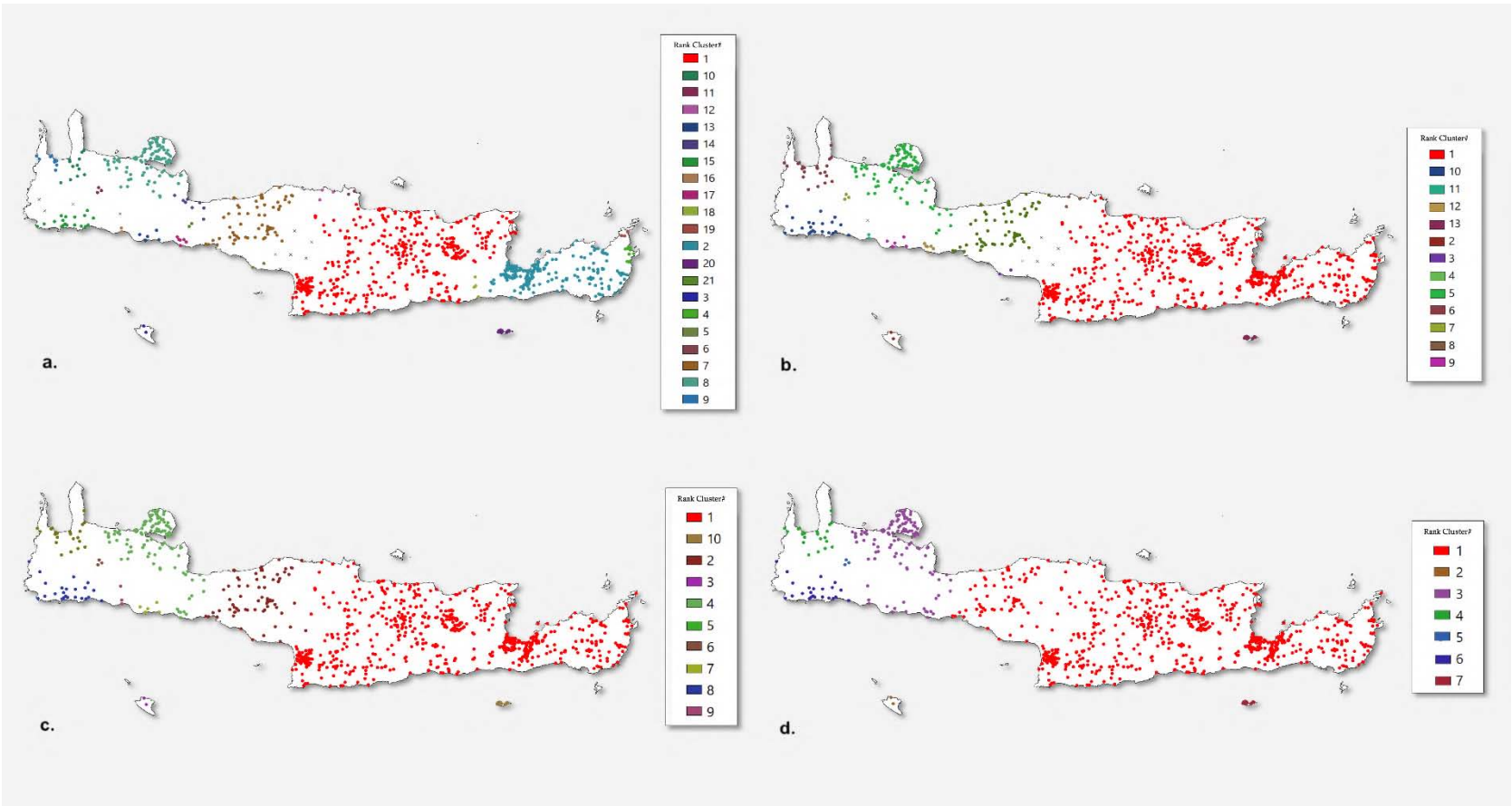


Figura 4.7. Evolución progresiva en la estructura de los *clusters* (agrupaciones) a medida que aumenta el radio analizado en el caso de Creta. (a) 5 km; (b) 6 km; (c) 7 km; y (d) 8 km de radio.

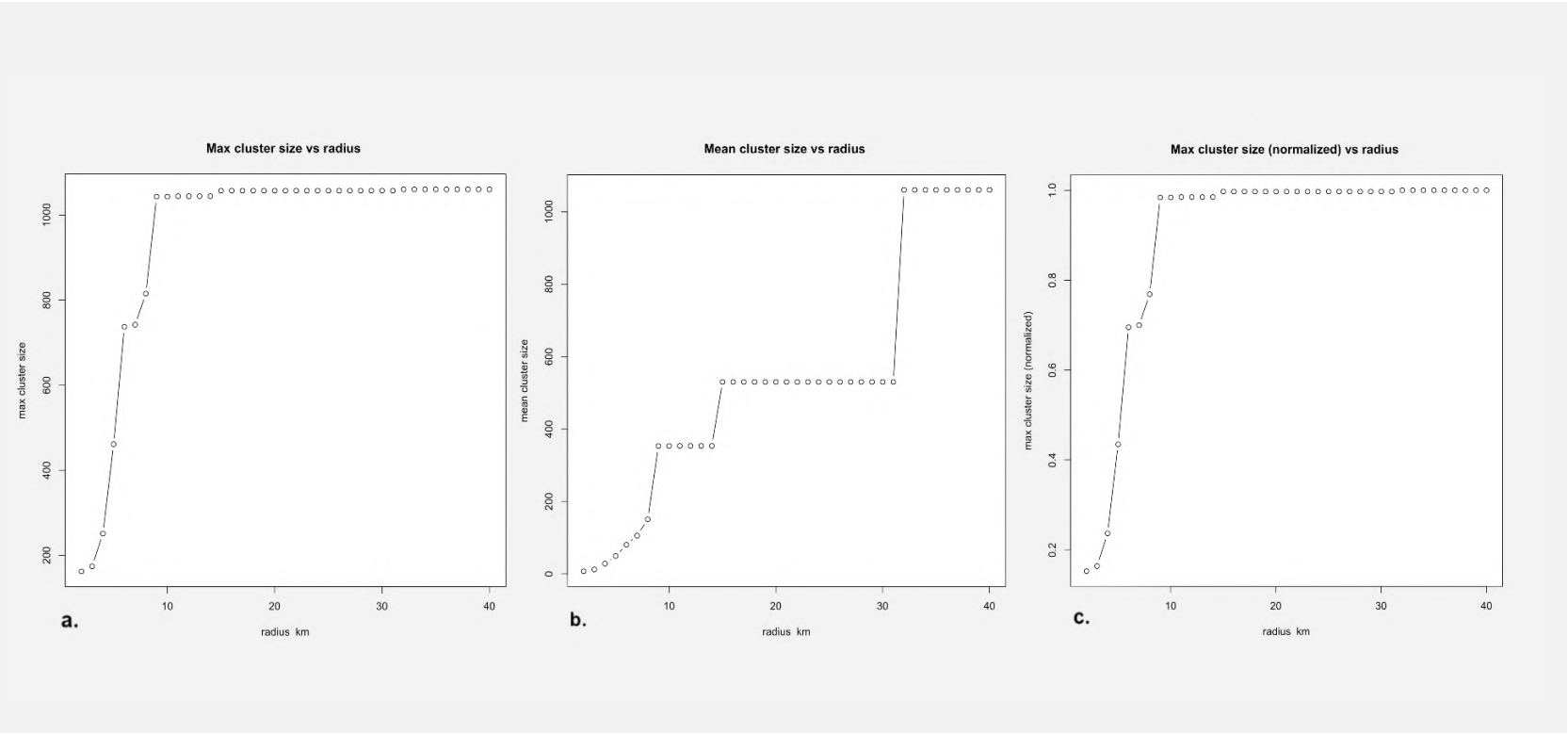


Figura 4.8. (a) Relación entre el tamaño máximo de los *clusters* y el radio en kilómetros. El análisis muestra un rápido crecimiento del tamaño a medida que el radio aumenta, alcanzando una estabilidad alrededor de los 10 km. (b) Relación entre el tamaño promedio de los *clusters* y el radio en kilómetros. El gráfico muestra un crecimiento escalonado en el tamaño promedio, con puntos de estabilización entre 10 y 30 km, indicando un patrón de conectividad espacial progresiva. (c) Relación entre el tamaño máximo normalizado de los *clusters* y el radio en kilómetros. La normalización permite observar que los *clusters* alcanzan su tamaño máximo relativo rápidamente, observando un cambio clave entre los 7-8 km y se mantiene estable a partir de los 10 km, reflejando la consolidación de una única agrupación a partir de este radio.

El siguiente paso consistió en profundizar en las posibles causas subyacentes que pudieran haber estado relacionadas con las pautas de distribución observadas. Este análisis implicó una evaluación exhaustiva de los patrones espaciales identificados, con el objetivo de determinar si estos podían estar influenciados por factores tanto humanos (áreas productivas, rutas de transporte, etc.) como no humanos (topografía, corredores naturales de movilidad, etc.). Para abordar estas cuestiones, se consideró la misma muestra con la totalidad de los asentamientos multiperiodo documentados (1.061 en total), con el propósito de examinar si los patrones de distribución estaban relacionados, y en qué grado de significación, con las variables anteriormente mencionadas.

En primer lugar, la gráfica de las zonas productivas, estimada mediante un análisis de densidad (KDE) (intensidad) de lugares productivos en la proximidad de los asentamientos (medida en el número de lugares productivos por km²), revela aspectos clave sobre cómo la distribución de estos asentamientos parece estar influenciada por la concentración y disponibilidad de recursos productivos (Figuras 4.9 y 4.10). En este sentido, los resultados muestran que los asentamientos se agrupan principalmente en áreas de alta densidad productiva, lo cual sugiere que su disposición está posiblemente influenciada por la concentración y la accesibilidad a estos recursos. Además, al analizar la extensión de estas zonas en la gráfica, se observa que donde la densidad de recursos muestra mayor dispersión, los asentamientos tienden a seguir el mismo patrón. De hecho, cuando la densidad de zonas productivas se concentra en áreas específicas, los asentamientos también tienden a agruparse mayoritariamente en esas zonas. En contraste, los lugares de baja densidad productiva presentan una menor cantidad de asentamientos.

Esta tendencia se ve reforzada al analizar los resultados de calcular los costes de desplazamiento (expresados en horas) desde los asentamientos hasta los lugares productivos. En este caso, las figuras 4.9 y 4.10 presentan la distribución de estos costes, que varían entre 0 y 10 horas, indicando que la mayoría de los asentamientos se encuentran dentro del rango de 0 a 2 horas de desplazamiento hacia la zona productiva más cercana. En consecuencia, la combinación de una alta densidad de asentamientos y tiempos de desplazamiento reducidos parece señalar a una preferencia clara por ubicaciones cercanas a estas áreas, minimizando así el tiempo y esfuerzo necesarios para acceder y gestionar estos recursos.

Cabe destacar que se ha identificado también un número menor de asentamientos ubicados a distancias que implican un coste de desplazamiento mayor, entre 4 y 10 horas. Aunque menos frecuentes, los patrones de localización y distribución de estos asentamientos en relación con las zonas productivas evidencian que, en ciertos casos, es posible que se hubieran priorizado otros factores en la elección de estas ubicaciones. Estos podrían estar vinculados con ventajas estratégicas, tales como posiciones defensivas elevadas, control territorial, acceso a recursos específicos o consideraciones socioculturales.

Por tanto, en términos generales, los resultados sugieren que la distribución espacial de los asentamientos revela una fuerte tendencia hacia el agrupamiento en torno a áreas con acceso a recursos clave, formando núcleos en zonas de alta productividad. La prevalencia de asentamientos situados a menos de 2 horas de estas áreas productivas apunta también en la misma dirección, es decir, a una planificación orientada a optimizar el acceso y la gestión de recursos esenciales. Esto indica que la proximidad a estas zonas fue

probablemente un factor crucial en la localización y distribución de la mayoría de los asentamientos en Creta durante los periodos analizados. Sin embargo, la identificación de asentamientos que siguen patrones de distribución distintos, aunque menor representados, plantea interrogantes sobre otros posibles factores de influencia. En este caso, podría ser valioso explorar con mayor profundidad las posibles causas subyacentes —ecológicas, económicas, culturales, políticas o sociales— que pudieron haber contribuido a la disposición de estos asentamientos en zonas que no necesariamente priorizan la proximidad a zonas de alta productividad.

En cuanto a los costes de desplazamiento desde los antiguos asentamientos hacia las rutas históricas y corredores naturales de movilidad (FMN), también parece existir una relación de influencia entre la ubicación y distribución de los asentamientos y la presencia de estas estructuras. En primer lugar, los costes de desplazamiento hasta las rutas históricas conocidas presentan un rango de 0 a 2 horas, con una mayor concentración en el intervalo de 0 a 1 hora (Figuras 4.9 y 4.10). La alta densidad de asentamientos en esta categoría indica una marcada preferencia por ubicarse cerca de estas rutas. Esta proximidad habría sido esencial para facilitar el transporte e intercambio, reforzando así la cohesión social, económica y cultural de estas comunidades, lo que evidencia la importancia de estas vías como canalizadoras de redes de interacción.

En cuanto a los costes de desplazamiento derivados de las rutas o corredores de movilidad generados mediante FMN, estos presentan un rango similar al de las rutas históricas conocidas, es decir, entre 0 y 2 horas, con una mayor concentración en el intervalo de 0 a 1 o 1.5 horas (Figuras 4.9 y 4.10). Esto sugiere una posible relación directa entre la distribución de los asentamientos

y estas estructuras de movilidad. De hecho, ambas redes —rutas históricas conocidas y corredores de movilidad generados mediante FMN— muestran un rango de accesibilidad bajo, lo cual indica que una gran parte de los asentamientos estaban ubicados próximos a rutas de tránsito. Este patrón parece señalar que las rutas o corredores de movilidad históricos ofrecían una conectividad más directa y adecuada a las necesidades de estas comunidades, desempeñando un papel clave en la estructura territorial y en la organización de los asentamientos.

Por otro parte, al analizar el comportamiento de las gráficas de las rutas históricas conocidas y los corredores de movilidad generados mediante FMN —tema que se desarrollará en el siguiente capítulo—, la similitud en sus patrones de localización y distribución puede ofrecer una validación indirecta de la metodología empleada para identificar estas estructuras. Esto se debe a que ambas gráficas muestran una tendencia similar en términos de accesibilidad desde los asentamientos, con una alta concentración de estos en zonas de bajo coste de desplazamiento y una disminución gradual conforme aumenta la distancia. Esta similitud en el comportamiento revela que las rutas FMN capturan una estructura de conectividad comparable a la de las rutas históricas conocidas. Por tanto, el hecho de que las rutas FMN reproduzcan de forma precisa el patrón de accesibilidad de las rutas históricas valida, en cierta medida, la aplicación de análisis de superficie de coste acumulado como un método efectivo para identificar posibles corredores de movilidad históricos.

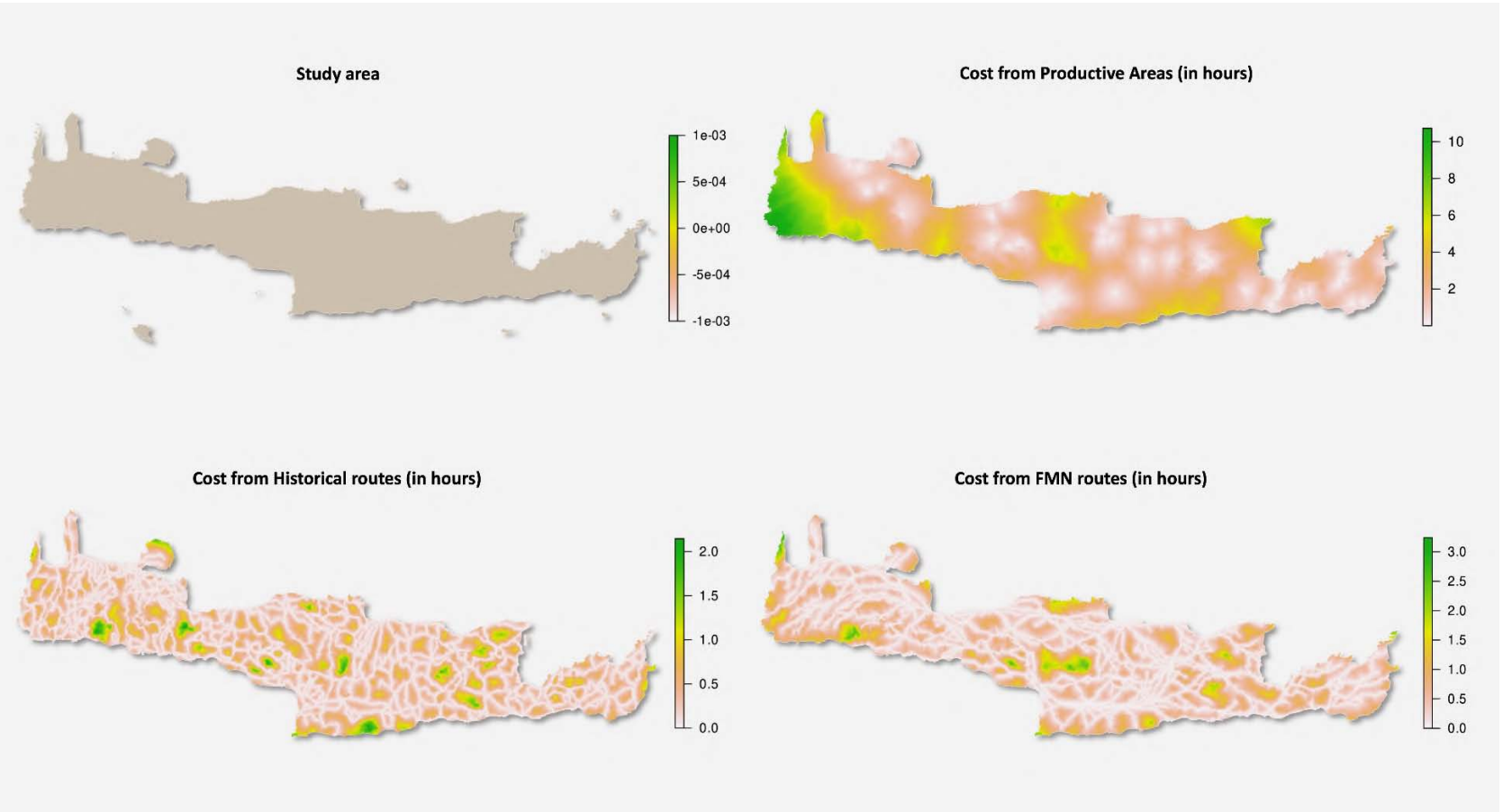


Figura 4.9. Mapa del área de estudio que representa la isla de Creta en su totalidad, junto con los costes de desplazamiento (en horas) desde los asentamientos a zonas productivas, rutas históricas y rutas simuladas (FMN). Las escalas de cada representación reflejan la accesibilidad en términos de tiempo (en horas), lo que permite visualizar cómo la proximidad a estos elementos puede influir en la distribución espacial de los asentamientos.

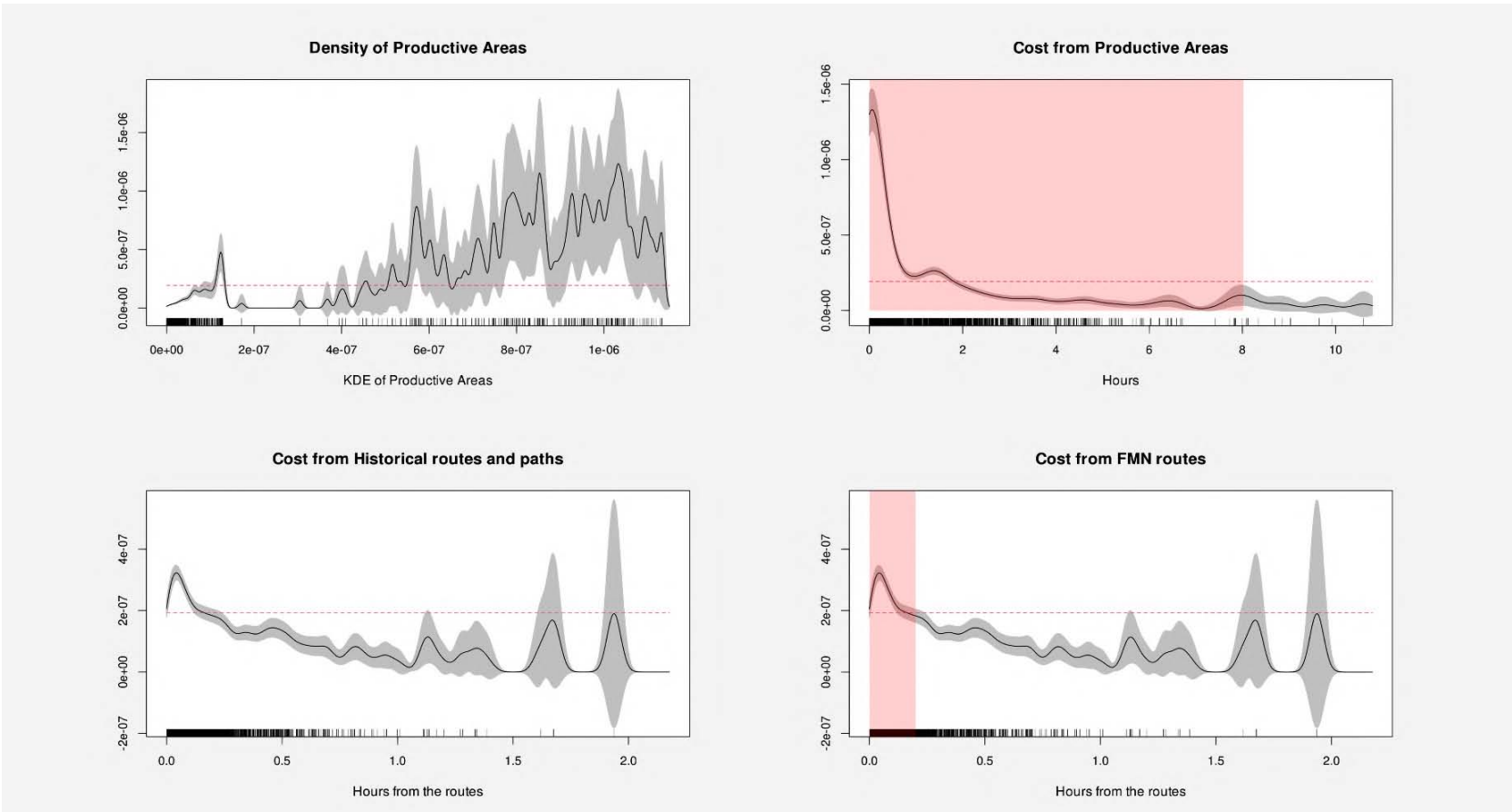


Figura 4.10. (*Arriba*) Distribución de la densidad y los costes de desplazamiento de las zonas productivas. Estos gráficos muestran la concentración de lugares productivos en relación con los asentamientos, destacando las áreas de mayor intensidad y la distribución de los costes de desplazamiento (en horas) desde los asentamientos hasta estas zonas. (*Abajo*) Distribución de los costes de desplazamiento desde las rutas históricas (*izquierda*) y las rutas simuladas mediante FMN (*derecha*) a los asentamientos. Ambos gráficos muestran la accesibilidad en función del tiempo de desplazamiento, proporcionando una estimación de cómo la cercanía a rutas de tránsito influye en la distribución de los asentamientos.

En un segundo nivel de análisis, se evaluó la fortaleza explicativa de cada una de estas variables en relación con los patrones de localización y distribución observados en los asentamientos. Para ello, se emplearon varias pruebas estadísticas que ofrecen una comprensión más detallada de las asociaciones inicialmente identificadas. Entre estas pruebas se incluyen el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S), las pruebas de Berman (Z1 y Z2), *Receiver Operating Characteristics* (ROC) y *Area Under the Curve* (AUC). A continuación, se presentan los resultados obtenidos en relación con cada variable considerada, es decir, la densidad (intensidad) de lugares productivos, el coste (en horas) de desplazamiento desde estos lugares y el coste (en horas) desde las rutas potenciales de tránsito hacia los asentamientos. En esta última, se han evaluado, al igual que en los casos anteriores, tanto las rutas históricas conocidas como los corredores naturales de movilidad (FMN).

Los resultados del test K-S indican que todas las variables analizadas presentan una diferencia significativa respecto a una distribución aleatoria en la ubicación de los asentamientos ($p < 2.2e\text{-}16$), lo que refleja una probabilidad prácticamente nula de que los patrones observados sean fruto del azar. Los valores elevados de D refuerzan esta conclusión, ya que sugieren una desviación marcada respecto a la aleatoriedad (Tabla 4.2). Esto implica que los valores mostrados por cada variable muestran una relación estadísticamente significativa en relación a la distribución de los asentamientos, indicando que dicha distribución no es aleatoria, sino que responde a factores específicos. En particular, el valor para el "coste de desplazamiento desde las zonas productivas" ($D = 0.3340$) sugiere una fuerte asociación entre la proximidad a estas áreas y la ubicación de los asentamientos. De manera similar, el valor para la "densidad de áreas

productivas" (D = 0.2848) subraya la importancia de estos lugares en la organización y estructuración del paisaje.

En cuanto a los valores de Z1 y Z2 en las pruebas de Berman, ambos muestran valores estadísticamente significativos para todas las variables analizadas — i.e., "densidad de zonas productivas", "coste desde zonas productivas", "coste desde rutas históricas" y "coste desde rutas simuladas (FMN)"—, lo que indica una fuerte relación entre cada variable y la distribución de los asentamientos (Tabla 4.2). En particular, los valores negativos de Z1 y Z2 para el coste desde las zonas productivas, las rutas históricas y las rutas FMN indican una tendencia de los asentamientos a ubicarse en áreas con un bajo coste de desplazamiento en relación con estas variables. Esto refuerza la hipótesis de que los asentamientos se distribuyeron estratégicamente en zonas de fácil accesibilidad a recursos y rutas de tránsito. En concreto, el coste desde las zonas productivas presenta los valores negativos más elevados (Z1 = -15.15, Z2 = -31.051), lo que respalda la idea de que la accesibilidad a estas zonas fue un factor decisivo en la disposición de los asentamientos. Asimismo, los valores positivos y altos para la densidad de áreas productivas (Z1 = 58.843, Z2 = 26.294) sugieren que los asentamientos tendían a ubicarse en zonas de alta productividad. Este patrón parece demostrar que la proximidad a áreas productivas no solo facilitaba la obtención de recursos esenciales, sino que también podría haber jugado un rol clave en el crecimiento y sostenibilidad de las comunidades, dada la concentración de estos recursos.

Finalmente, el análisis de la curva ROC y los valores AUC, permiten evaluar la capacidad discriminatoria de cada variable para predecir la ubicación de los asentamientos. En este sentido, los resultados muestran que el "coste de desplazamiento desde las zonas productivas" (AUC = 0.7239), seguido por la

"densidad de zonas productivas" (AUC = 0.6908), son las variables con mayor capacidad discriminatoria entre las variables analizadas (Figura 4.11 y Tabla 4.2). Estos valores apuntan a que la proximidad y accesibilidad a estas áreas fueron factores clave en la elección de los emplazamientos, probablemente reflejando una estrategia orientada a maximizar el acceso a recursos esenciales. Además, la similitud en los valores de AUC y en la gráfica ROC tanto de las rutas históricas como de los corredores obtenidos mediante FMN (ambos con AUC = 0.6425), muestra que las rutas generadas mediante FMN ofrecen una aproximación razonable a las estructuras de movilidad históricas en la isla. Esta concordancia respalda la metodología empleada para identificar rutas o corredores de movilidad históricos, especialmente en contextos donde no se dispone de evidencia material directa.

En conjunto, los resultados de estas pruebas estadísticas respaldan la hipótesis inicial de que tanto la proximidad a redes de transporte como la accesibilidad a zonas productivas influyeron directamente en la ubicación y distribución de los asentamientos en Creta durante los periodos históricos analizados. De todas las variables, el acceso a zonas productivas resulta ser el factor estadísticamente más significativo, lo que evidencia que la accesibilidad a recursos naturales, como llanuras fértiles o ubicaciones estratégicas vinculadas a rutas o corredores naturales desempeñaron un papel clave en la estructuración y planificación territorial. Además, la similitud observada, tanto a nivel cuantitativo como gráficamente, entre las rutas históricas y las generadas mediante FMN respalda el modelo como un método eficaz para inferir rutas en contextos arqueológicos sin registros o evidencia material de estas estructuras. Esto demuestra que estos modelos ofrecen resultados satisfactorios para identificar redes de movilidad históricas, capturando las complejas dinámicas de interacción que transformaron estos paisajes.

Tabla 4.2. Resultados de las pruebas estadísticas (K-S, Berman Z1 y Z2, y análisis de ROC-AUC) para evaluar la influencia de distintas variables en la distribución de antiguos asentamientos en Creta.

	Covariate	**Kolmogorov-Smirnov**		**Berman**				**AUC**
		D	*p-value*	*Z1*	*p-value*	*Z2*	*p-value*	
Settlements	Intensity of productive areas	0,28479	< 2.2e-16	58,843	< 2.2e-16	26,294	< 2.2e-16	0,690806
	Cost from productive areas	0,33401	< 2.2e-16	-15,15	< 2.2e-16	-31,051	< 2.2e-16	0,723945
	Cost from historical routes	0,20698	< 2.2e-16	-11,151	< 2.2e-16	-19,757	< 2.2e-16	0,642507
	Cost from FMN routes	0,20679	< 2.2e-16	-11,151	< 2.2e-16	-19,755	< 2.2e-16	0,642473

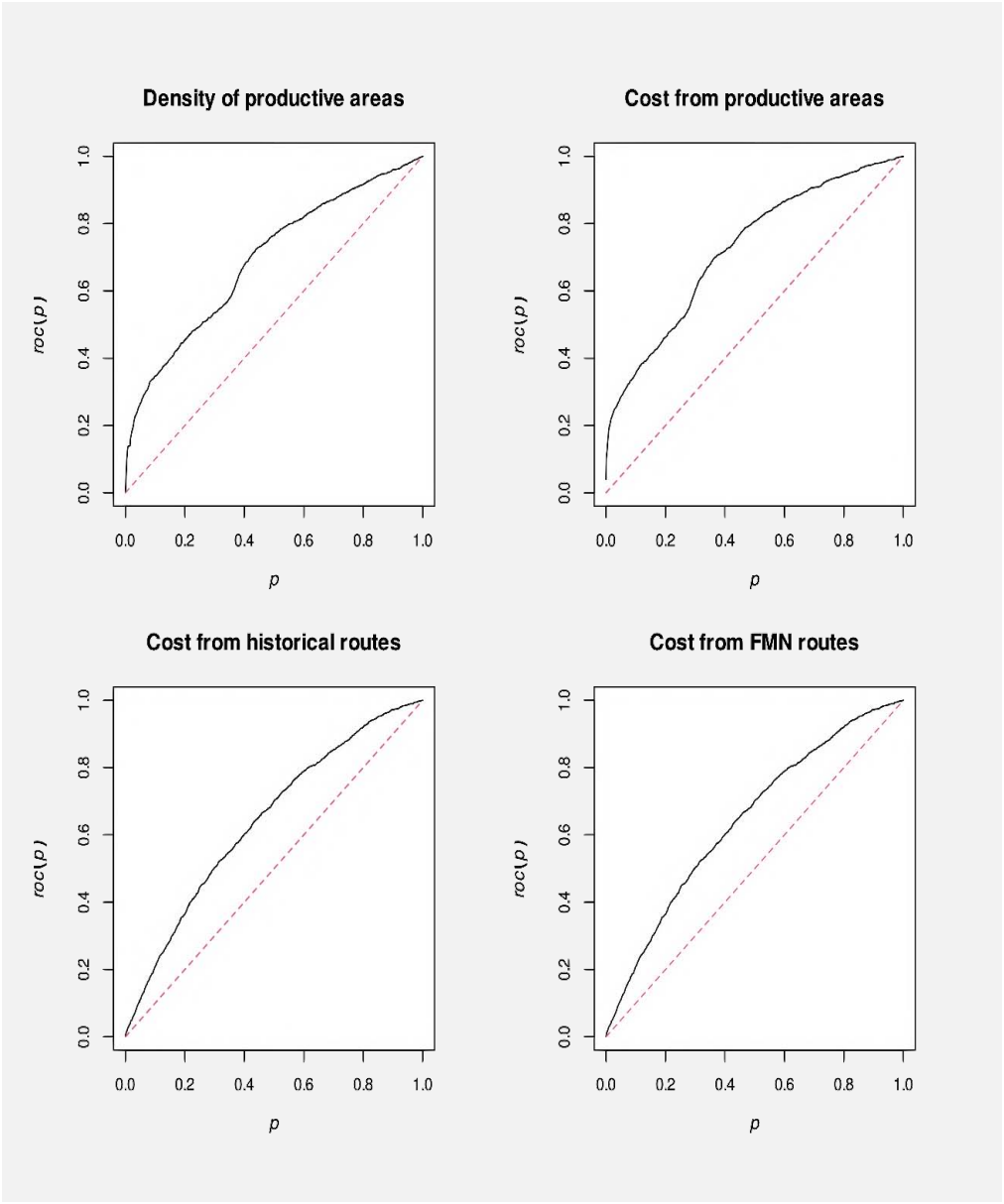


Figura 4.11. Gráficos ROC que muestran la capacidad discriminatoria de distintas variables en la predicción de la ubicación de antiguos asentamientos en Creta. Estas corresponden a las variables: densidad de zonas productivas, coste desde zonas productivas, coste desde rutas históricas y coste desde rutas simuladas (FMN). La proximidad de cada curva a la esquina superior izquierda refleja la efectividad de cada variable en la identificación de asentamientos. Cabe destacar, que las curvas de "rutas históricas" (*historical routes*) y "rutas FMN" (*FMN routes*) presentan un comportamiento muy similar, lo que parece confirmar la capacidad del modelo FMN para reflejar rutas funcionales en el territorio, demostrando que este enfoque puede ser útil para simular caminos efectivos en términos de desplazamiento y conectividad histórica.

4.4.2 Marmárica (NE-Libia/NO-Egipto)

Siguiendo el enfoque previamente utilizado en el caso anterior, los análisis sobre la distribución espacial de los sitios arqueológicos documentados en Marmárica han permitido explorar con mayor detalle la estructura espacial de estos sitios y determinar si presentan un patrón aleatorio o si, en cambio, exhiben agrupaciones o asociaciones significativas que puedan haber estado influenciadas por factores específicos. Para ello, se emplearon secuencialmente las mismas pruebas estadísticas iniciales, —i.e., la estimación de la densidad de Kernel (KDE), la función *K* de Ripley, el test de Hopkins-Skellam y análisis de percolación—, con el fin de determinar el tipo de distribución y organización espacial, y evaluar las propiedades de conectividad territorial en esta importante región norteafricana.

En cuanto a la estimación de la densidad de Kernel (KDE), se han podido determinar claramente áreas con alta y baja concentración de sitios arqueológicos a lo largo de esta región (Figura 4.12). En particular, destacan los territorios septentrionales como las zonas con mayor densidad, especialmente en torno a los actuales centros urbanos de Tobruk y Bardia, dentro del distrito de Al Butnam, en el noreste de Libia (Marmárica occidental). Asimismo, se observan patrones similares en la región oriental, donde se detecta una alta densidad de agrupaciones en torno a los centros urbanos de Sidi Barrani, Marsa Matruh, El Negaila, El Hamam y El Dabaa, dentro del distrito de Matruh, en el noroeste de Egipto (Marmárica oriental). Estos resultados muestran, de manera preliminar, que la posición geográfica y el entorno natural de esta región parecen haber jugado un papel significativo en la elección de estos lugares para el establecimiento de asentamientos más estables, especialmente en las zonas costeras y la meseta

norte. Esto se debe posiblemente a que estas zonas se caracterizan por condiciones climáticas más favorables marcadas por la influencia mesogea, en comparación con las zonas del interior, lo que habría proporcionado un entorno más adecuado para el establecimiento y desarrollo de estas comunidades.

Además de las altas concentraciones detectadas en las áreas septentrionales, también se identificaron, aunque en menor medida, patrones similares de alta densidad de sitios arqueológicos en torno a los oasis del interior, siendo especialmente significativo el caso de Siwa, en los márgenes del desierto de Libia (Egipto). Esto evidencia la importancia estratégica y socioeconómica de estos lugares como puntos de convergencia dentro de paisajes predominantemente caracterizados por su aridez. Así, la presencia de recursos hídricos en estos enclaves los convirtió en nodos estratégicos dentro de las rutas comerciales, facilitando redes de interacción que impulsaron el desarrollo de comunidades que se asentaron aprovechando las posibilidades que les ofrecía específicamente este entorno.

En consecuencia, factores como las condiciones medioambientales, la disponibilidad de recursos y/o la accesibilidad a determinadas áreas parecen haber desempeñado un papel estratégico en la configuración espacial de los sitios arqueológicos en Marmárica. Esta perspectiva permite obtener una imagen preliminar de cómo estos elementos pudieron haber influido en la elección de los emplazamientos y en la organización territorial a lo largo del tiempo. No obstante, resulta fundamental continuar profundizando en estos patrones para comprender con mayor precisión los factores específicos y el papel que pudieron haber ejercido en el desarrollo y estructuración de estas comunidades y paisajes.

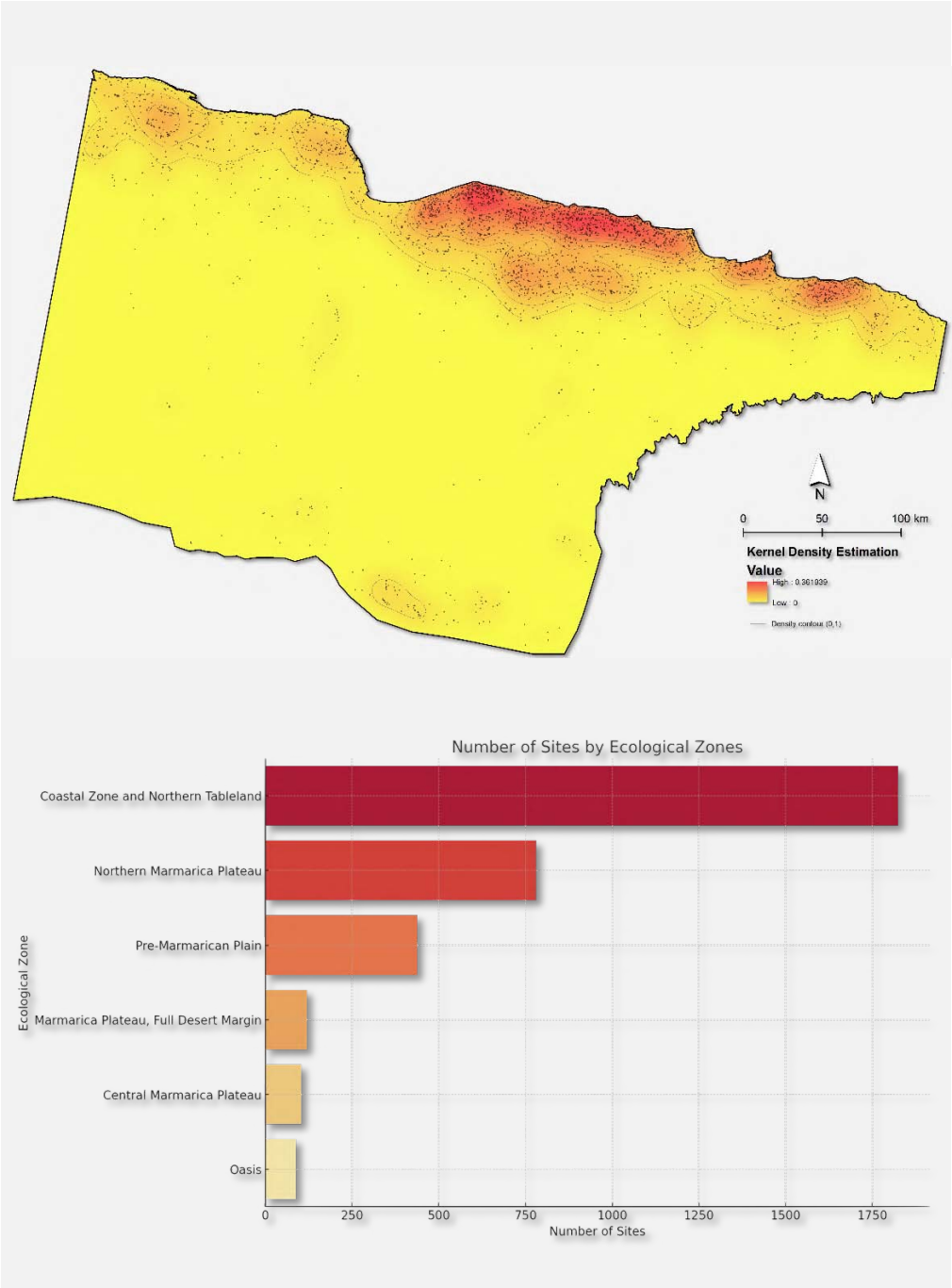


Figura 4.12. (*Arriba*) Estimación de la densidad de Kernel (KDE) sobre la distribución de los sitios documentados en la región de Marmárica. Las zonas de mayor densidad se muestran con colores má s intensos, mientras que las de menor densidad presentan tonalidades más suaves, lo que permite identificar patrones y estructuras en la distribución espacial de los sitios. (*Abajo*) Gráfico qu e representa la distribución del número total de sitios arqueológicos documentados por zonas ecológicas.

Esta primera evaluación, que muestra una tendencia clara hacia la agrupación de sitios arqueológicos en áreas específicas, se complementó con un análisis estadístico utilizando la función *K* de Ripley. Esta prueba ha permitido examinar la distribución espacial de los sitios arqueológicos a diferentes escalas y a largo plazo, proporcionando una visión más detallada de cómo se organizan en el paisaje. Tras la aplicación de este análisis, se observa que la curva correspondiente a los sitios (reales) se mantiene consistentemente por encima de la curva esperada para una distribución aleatoria de sitios (simulados) en todas las escalas de distancia evaluadas (Figura 4.13). Esto indica que los sitios arqueológicos en Marmárica no se distribuyen aleatoriamente; es decir, la disposición observada no es producto del azar, descartando un escenario de CSR. En cambio, los sitios siguen un patrón definido que tiende claramente hacia la agrupación.

Estos resultados confirman la tendencia al agrupamiento de los sitios arqueológicos, señalando que determinados factores geográficos, ambientales o socioculturales subyacentes pudieron haber influido significativamente en el tipo de distribución mostrada, en lugar de promover una distribución uniforme en toda la región. Esta observación no hace sino corroborar los patrones ya identificados en el análisis inicial de densidad de Kernel (KDE). Por tanto, la coherencia entre ambos resultados refuerza la conclusión de que los sitios arqueológicos en Marmárica tienden a concentrarse predominantemente hacia las zonas septentrionales, especialmente en las áreas costeras y en la meseta norte, así como, en menor medida, en torno a los oasis del interior.

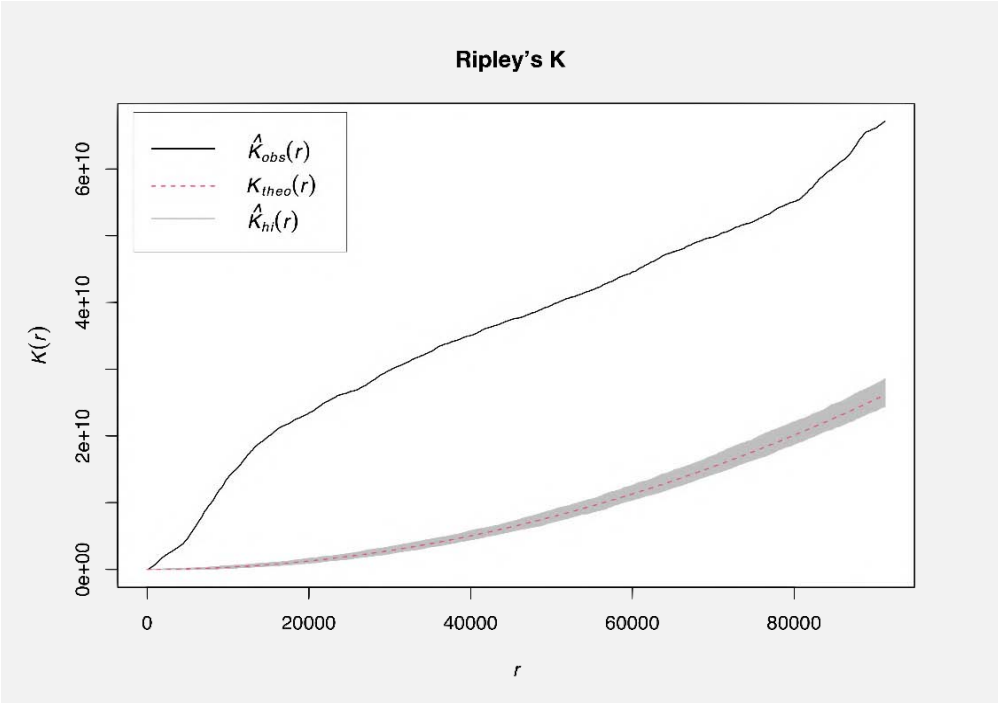


Figura 4.13. Representación gráfica de la distribución de los sitios documentados en Marmárica mediante la función *K* de Ripley. La gráfica ilustra cómo la curva correspondiente a los sitios reales se sitúa consistentemente por encima de la curva esperada para una distribución aleatoria de sitios simulados en todas las escalas de distancia evaluadas. Esto indica una estructura espacial no aleatoria, con una clara tendencia hacia el agrupamiento en la disposición de los asentamientos.

La aplicación complementaria del test de Hopkins-Skellam sobre esta misma distribución de sitios documentados, ha validado la tendencia hacia el agrupamiento observada en los análisis previos, ya que los resultados apuntan en la misma dirección. En este sentido, el test arrojó un valor de *A* considerablemente inferior a 1 (*A* = 0,045863), lo cual señala una clara desviación de la aleatoriedad, indicando que los sitios arqueológicos exhiben un patrón de agrupamiento significativo. Además, el valor *p* significativamente bajo (< 2,2e-16) obtenido en este test implica que la probabilidad de que la tendencia al agrupamiento sea producto del azar es prácticamente nula, reforzando así la validez de los resultados. Por tanto, la consistencia de estos resultados proporciona una base sólida para concluir

que el patrón de agrupamiento observado es estadísticamente significativo, lo que fortalece aún más las conclusiones derivadas de estos análisis y reafirma la importancia de considerar qué factores subyacentes podrían haber influido en la distribución espacial que muestran los sitios analizados.

Una vez identificado el tipo de distribución, se aplicaron varias pruebas estadísticas adicionales centradas específicamente en la distribución de los antiguos asentamientos. Entre ellas, el análisis de percolación aplicado a la totalidad de los 182 asentamientos multiperiodo documentados en esta región ha resultado especialmente útil, no solo para identificar diferentes niveles de agrupación, sino también para reconocer zonas centrales que actuaban como puntos clave de interconexión dentro de la red de asentamientos a lo largo de los periodos históricos considerados. Así, estos análisis han proporcionado tanto una base cuantitativa como una serie de representaciones gráficas que permiten visualizar cómo los asentamientos se agrupan gradualmente en determinadas áreas en función de su proximidad espacial, facilitando la identificación de patrones a distintas escalas de análisis. En estas representaciones, cada asentamiento está codificado por colores para indicar su pertenencia a un *cluster* cuando dos o más sitios están lo suficientemente cerca como para formar parte del mismo, según un umbral de distancia. Al ampliar progresivamente este umbral, se puede observar cómo los *clusters* más pequeños se combinan para formar otros más grandes, revelando cómo los asentamientos se interconectan entre sí (Figuras 4.14 y 4.15).

De este modo, los resultados indican que los antiguos asentamientos de Marmárica tienden a agruparse en *clusters* más pequeños cuando se consideran radios entre 0 y 10 km, lo que revela un nivel de conectividad local entre asentamientos cercanos. Sin embargo, al aumentar estos radios, los

asentamientos comienzan a integrarse en una estructura más interconectada, lo que evidencia una posible interrelación espacial significativa entre ellos. En particular, se observa un incremento progresivo en el tamaño de los *clusters* hasta aproximadamente los 20 km. A partir de esta distancia (20 km), el tamaño máximo del *cluster* de mayor tamaño deja de crecer significativamente y se estabiliza, lo que muestra que en este punto el sistema ha alcanzado un estado en el que la mayoría de los asentamientos están integrados dentro de una única agrupación. Este es un indicio de que el umbral de percolación podría encontrarse en esta zona, reflejando el punto crítico donde se expanden las redes de interacción.

En este contexto, cabe destacar dos incrementos especialmente significativos en el tamaño de los *clusters* entre los umbrales de 2 a 3 km y de 14 a 15 km (Figuras 4.14 y 4.15). Este notable aumento en el tamaño de las agrupaciones a estos radios parece evidenciar una posible relación con la distancia óptima para la interacción diaria, donde las comunidades podían mantener relaciones cercanas y regulares. De hecho, considerando que una persona puede caminar, en promedio, entre 25 - 30 km al día (en terreno llano y condiciones favorables), aproximadamente 14-15 km representaría la distancia máxima para un viaje de ida y vuelta en un solo día, lo cual pudo haber influido en la planificación y organización territorial (Whiting, 2013; Paprocki, 2019).

Por tanto, es posible inferir que el umbral de percolación crítico se encuentra cercano a los 20 km, una distancia en la que se alcanza una amplia conectividad entre asentamientos. Este umbral revela una organización espacial en la que las comunidades están distribuidas estratégicamente para facilitar la interacción diaria, optimizando así la accesibilidad y el flujo de recursos en un entorno potencialmente adverso. De manera similar, se

observa una segunda escala de conectividad en el rango de 30-40 km, que representa posiblemente redes de alcance regional, en la que asentamientos más alejados se integran, manteniendo relaciones de intercambio en una escala mayor. Así, los distintos niveles de conectividad muestran una estructura territorial compleja, en la que las relaciones parecen no solo responder a necesidades inmediatas de proximidad, sino también a asegurar una cohesión más amplia, permitiendo la integración de asentamientos lejanos en una red que sustenta los procesos de comunicación e intercambio a lo largo de la región de Marmárica.

Este enfoque multiescalar es esencial para comprender las dinámicas espaciales, ya que revela cómo los asentamientos interactúan y se estructuran en función de diferentes escalas. Por tanto, al identificar estas zonas y comprender su función dentro de las redes de conectividad, es posible obtener una visión más precisa de los patrones de asentamiento y las dinámicas de interacción que sustentaron e impulsaron el desarrollo de estas comunidades. De manera similar, estos puntos críticos de conectividad podrían estar relacionados con aspectos como la movilidad, el acceso a recursos y las posibles relaciones socioeconómicas o socioculturales entre asentamientos. Así, el tipo de distribución presente en los asentamientos parece indicar que en Marmárica estos estaban organizados de forma que garantizaba una interconectividad eficaz. Esta idea es coherente con un contexto en el que la proximidad a otros asentamientos facilitaría el acceso e intercambio de recursos, aspectos esenciales en esta región. De este modo, estos patrones podrían haber sido claves para mantener la resiliencia de las comunidades frente a los diferentes desafíos, asegurando una red continua de intercambio y cooperación entre asentamientos a lo largo de los distintos periodos históricos analizados.

Además de cuantificar el tamaño y la distribución de los *clusters* formados, este análisis ha permitido igualmente identificar zonas centrales que actúan como puntos clave de interconexión a largo plazo. En este sentido, destaca especialmente la agrupación en torno a las actuales Marsa Matruh y El Daaba, en el noreste de Egipto (Marmárica oriental) (Figuras 4.14 y 4.15). Asimismo, aunque en menor medida, se observan agrupaciones significativas que parecen seguir posibles rutas de conexión entre las zonas costeras y los oasis del interior, principalmente hacia Al-Jaghbub en Libia y Siwa en Egipto. Estas zonas, que coinciden con importantes centros urbanos actuales, muestran concentraciones significativas de antiguos asentamientos, lo que sugiere que pudieron haber actuado como nodos de enlace en las redes que estructuraron la región a lo largo del tiempo.

Estas agrupaciones no solo evidencian que la distribución de los asentamientos no es aleatoria, sino que también sugieren la existencia de posibles causas subyacentes relacionadas con factores de distinta naturaleza. Esto se debe a la proximidad de estas agrupaciones a áreas cercanas a puertos marítimos, terrenos agrícolas o fronteras de territorios políticos, lo cual podría indicar que la ubicación de los asentamientos podría estar estratégicamente vinculada a centros clave de control territorial o actividad socioeconómica. Esto plantea la posibilidad de que estas sociedades eligieran ciertos lugares no solo como una respuesta adaptativa al entorno, sino también en función del potencial de conexión con otros centros (razones socioeconómicas), lo cual habría sido esencial para la sostenibilidad y el desarrollo de estas comunidades.

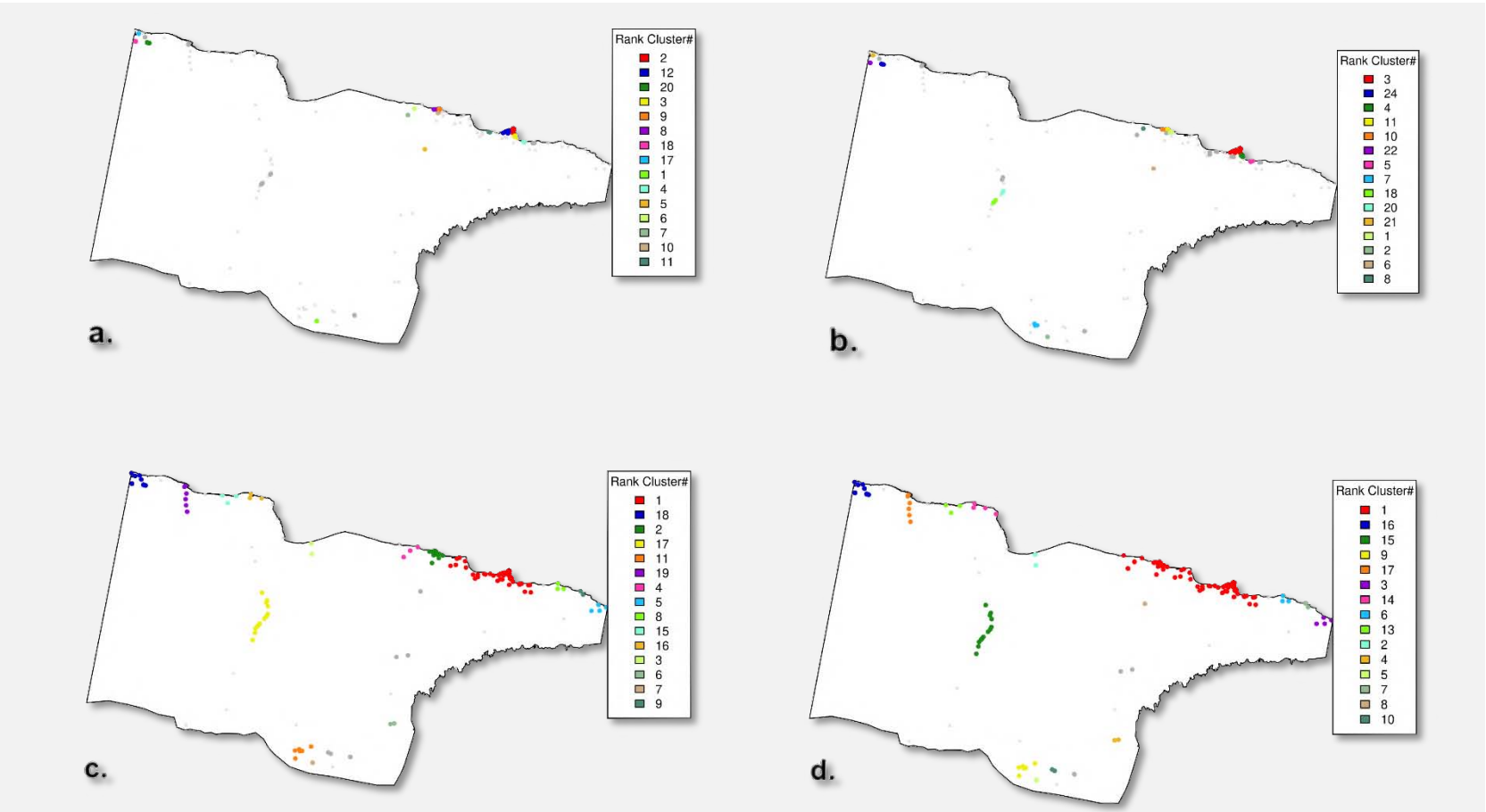


Figura 4.14. Agrupaciones o *clusters* de asentamientos codificados por colores a diferentes radios (km) en Marmárica. Estas representaciones muestran cómo los asentamientos se agrupan y se conectan de manera progresiva al ampliar el radio de análisis. En el rango más bajo, de 2 a 3 km (a y b), los *clusters* son pequeños y reflejan interacciones locales y conexiones de proximidad inmediata entre asentamientos cercanos. Sin embargo, al incrementar el radio a 14 y 15 km (c y d), los asentamientos forman *clusters* más grandes, lo que sugiere una estructura de interacción de carácter regional.

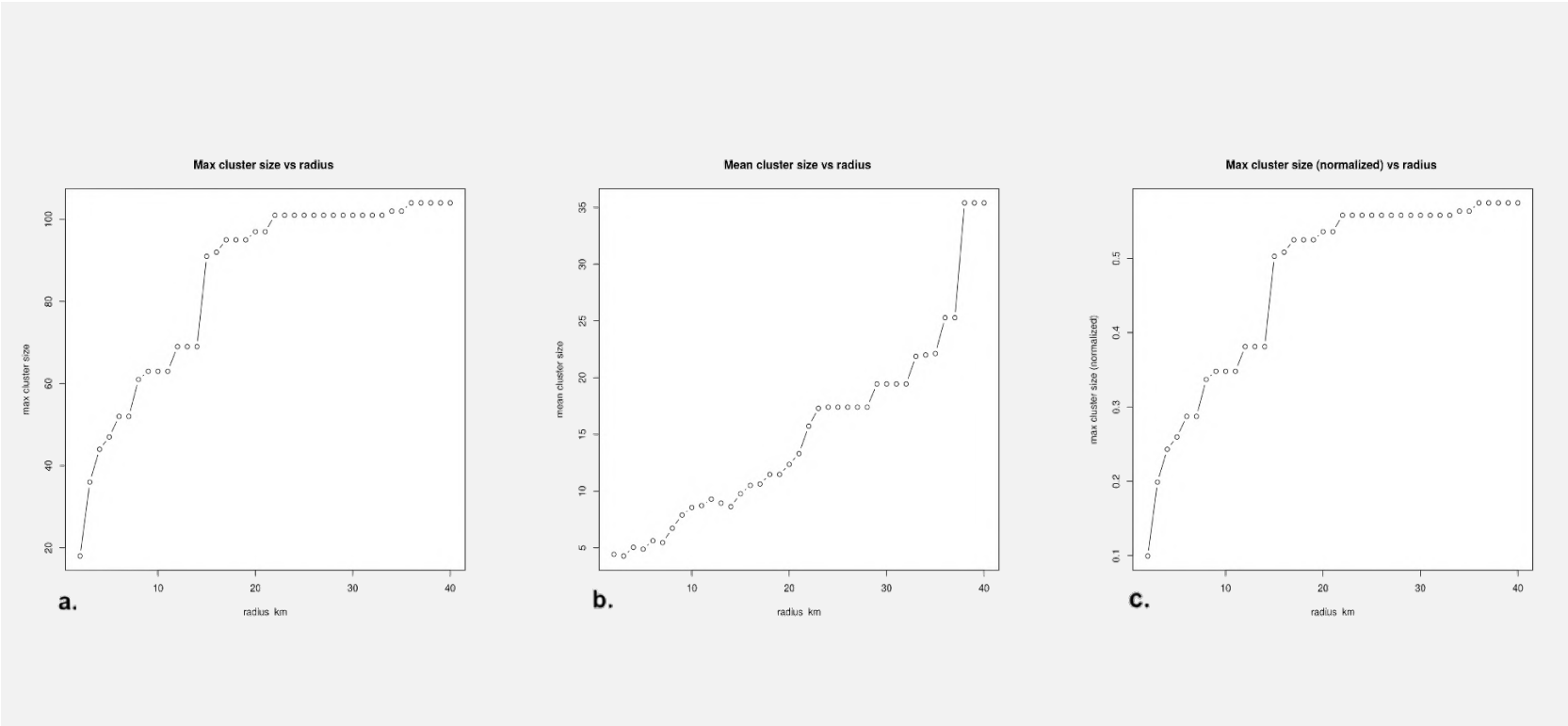


Figura 4.15. Relación entre el tamaño de los *clusters* y el radio analizado para los asentamientos documentados en Marmárica. En la gráfica (a), se observa que el tamaño máximo del *cluster* alcanza un punto de estabilización a partir de los 20 km, lo que señala el umbral de percolación crítico en el cual los asentamientos logran su máxima conectividad. La gráfica (b) muestra un aumento en el tamaño promedio de los *clusters*, lo que sugiere una conectividad adicional que se extiende en el rango de 30-40 km. Finalmente, la gráfica (c), que normaliza el tamaño máximo del *cluster*, confirma un punto crítico de conectividad alrededor de los 14-15 km, y revela una estructura de red continua que se mantiene a partir de los 20 km.

En un segundo nivel de análisis, se profundizó en las posibles causas subyacentes que pudieran haber estado relacionadas con los patrones de distribución observados en Marmárica. Para ello, se consideró la misma muestra de 182 asentamientos multiperiodo, con el propósito de evaluar si los patrones de distribución identificados estaban asociados, y en qué medida, con diversas variables vinculadas tanto a factores humanos como no humanos. Específicamente, de manera inicial, se estimó la distribución relativa de los costes de desplazamiento asociados a fuentes de agua (tanto construidas como naturales), lugares productivos, rutas históricas y corredores naturales de movilidad generados mediante FMN en relación con los asentamientos documentados (Figuras 4.16 y 4.17).

En una primera evaluación, los resultados indican que los asentamientos tienden a concentrarse dentro de una isocrona de 8 horas desde las zonas de captación de recursos (principalmente cisternas), áreas productivas y rutas de tránsito, incluyendo tanto las rutas históricas conocidas como los corredores generados mediante FMN. La isocrona de 8 horas es particularmente significativa, dado que coincide con la media anual de horas de luz diurna en la región de Marmárica (https://www.worlddata.info/), lo que podría indicar que los asentamientos estaban estratégicamente ubicados para maximizar la movilidad e interacción diaria, facilitando el acceso a recursos clave (Rodríguez-Corral & Rodríguez-Rellán, 2023: 12-14). De forma preliminar, por tanto, se podría inferir que los patrones de localización y distribución examinados parecen señalar una estrategia en la que las comunidades buscaban maximizar el acceso a recursos esenciales y facilitar la movilidad e interacción, con un enfoque adaptativo que equilibra tanto el acceso a fuentes de agua y zonas productivas como la cercanía a rutas de tránsito y corredores de movilidad.

Al profundizar en los resultados obtenidos para cada variable, se observa que los patrones de distribución mantienen una coherencia con las tendencias destacadas anteriormente. De hecho, zonas con alta densidad de asentamientos coinciden con bajos costes de desplazamiento hacia recursos hídricos, principalmente cisternas, mayoritariamente con tiempos de acceso de menos de 2 horas, y hacia áreas productivas en un rango de ≤ 8 horas de desplazamiento. Estos resultados reafirman la hipótesis inicial sobre la importancia de estos recursos en la configuración de los patrones de asentamiento y las estrategias de subsistencia adoptadas por las comunidades que habitaron estos paisajes. Por lo tanto, los resultados apuntan a una relación directa entre la ubicación de los asentamientos en Marmárica y una estrategia planificada para optimizar el acceso a recursos esenciales.

De manera similar, al analizar los costes de desplazamiento desde las rutas históricas y los corredores de movilidad generados mediante FMN, los resultados muestran que ambos se encuentran dentro de un radio de 2 horas a pie desde cualquier asentamiento. Esto permite establecer una relación significativa entre la presencia de rutas de tránsito y la ubicación de los asentamientos, dado que la proximidad a estas rutas facilitaría el acceso tanto a fuentes de agua como a áreas productivas. Además, la coincidencia entre las zonas de mayor intensidad de tránsito y el trazado de las rutas históricas documentadas y los corredores de movilidad generados mediante FMN sugiere que estos últimos representan de forma efectiva los corredores naturales de esta región. Esta observación es relevante, ya que, al igual que en el caso de estudio anterior, valida la metodología empleada para generar la red de movilidad, demostrando que estos modelos son capaces de capturar adecuadamente las rutas históricas o caminos tradicionales en diferentes contextos geográficos y ambientales.

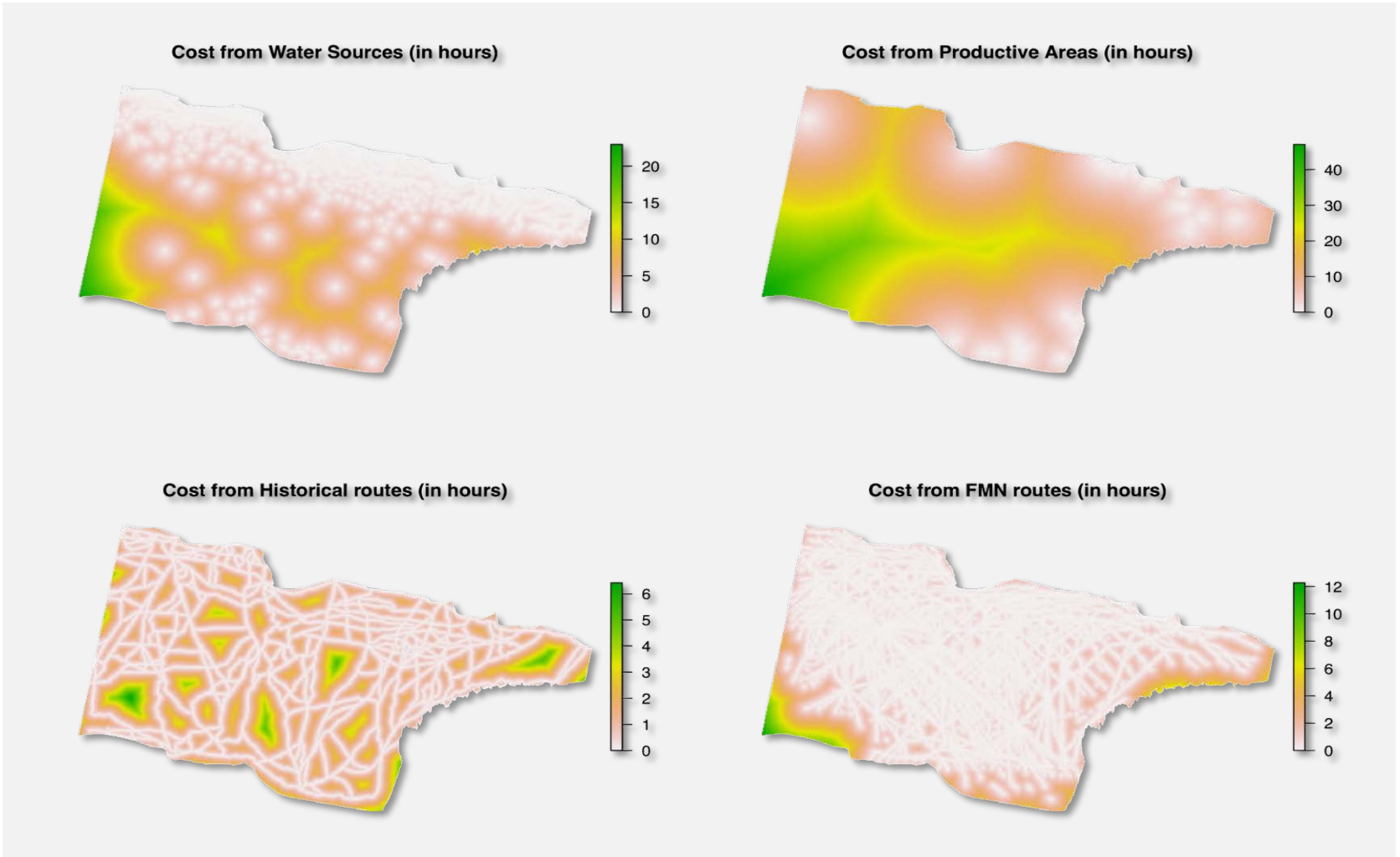


Figura 4.16. Costes de desplazamiento (en horas) calculados a partir de variables específicas, como fuentes de agua, áreas productivas, rutas históricas y corredores de movilidad generados mediante FMN.

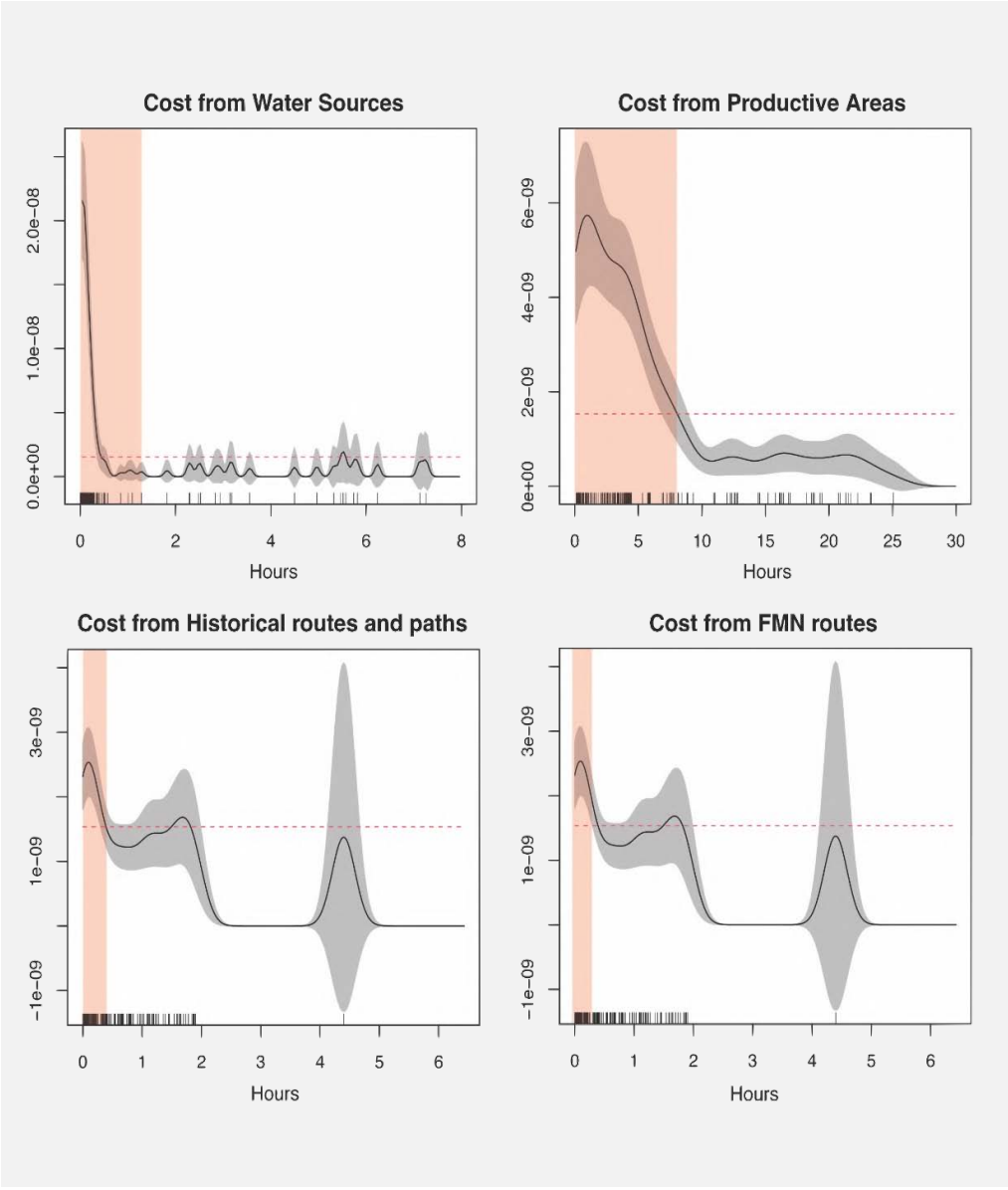


Figura 4.17. Representación gráfica de la estimación de la distribución relativa de la intensidad de los asentamientos en función de los costes de desplazamiento desde las fuentes de agua, áreas productivas, rut as históricas y corredores de movilidad generados (FMN) más cercanos. Se destaca la alta similitud en el comportamiento entre los costes de desplazamiento desde las rutas históricas documentadas y las rut as o corredores de movilidad (FMN).

Siguiendo el mismo proceso de evaluación de la significación de las variables consideradas en relación con los patrones de distribución identificados, se aplicaron una serie de pruebas estadísticas que han proporcionado evidencias adicionales para profundizar en las asociaciones inicialmente documentadas. Específicamente, el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) ha proporcionado información clave para detectar si la distribución de los asentamientos está influenciada por variables específicas. En la misma línea, el test de Berman ha sido fundamental para evaluar la significancia de los patrones espaciales observados, comparando distribuciones y permitiendo inferir si existen factores subyacentes específicos que influyen en la localización de los asentamientos. Finalmente, la curva ROC y el valor AUC han mostrado el poder discriminatorio de cada variable en relación con la distribución de estos asentamientos. En conjunto, estos análisis nos han proporcionado información gráfica y estadísticamente significativa para explorar tales cuestiones (Figura 4.18 y Tabla 4.3). Esto ha facilitado obtener una visión más completa y matizada de las dinámicas que influyen en la distribución espacial de los asentamientos, al identificar no solo la influencia que ejerce de manera individual cada variable, sino también sus interacciones, lo que ayuda a entender mejor cómo diversos factores podrían haberse combinado para dar forma a los patrones espaciales observados.

En primer lugar, los valores *D* obtenidos a partir del K-S revelan que todas las variables presentan una significancia estadística elevada en relación con la distribución de los asentamientos, lo que descarta la aleatoriedad ($p < 2.2e-16$). Sin embargo, existen diferencias en el peso específico de cada variable. Los valores *D* más altos se registran en la "intensidad de fuentes de agua" ($D = 0.65368$) y el "coste desde fuentes de agua" ($D = 0.67706$), lo cual indica que estas variables ejercen una influencia especialmente significativa en los

patrones de asentamiento. Estos resultados evidencian que la localización de los asentamientos no es aleatoria, sino que responde a una organización en torno a la proximidad a recursos esenciales, destacando el acceso al agua como un factor clave en un entorno marcado por su aridez. En cambio, el resto de variables, aunque estadísticamente significativas, muestran valores *D* menores, lo que implica que su influencia es menos significativa en comparación.

En segundo lugar, los valores proporcionados por Z1 y Z2 en el test de Berman aporta información adicional sobre la relación entre cada variable y los patrones de distribución de los asentamientos. Los valores positivos y altamente significativos para la "intensidad de fuentes de agua" (Z1 = 17.034; Z2 = 15.967) y la "intensidad de áreas productivas" (Z1 = 14.565; Z2 = 4.4559) confirman que los asentamientos se concentran en áreas con alta densidad de estos recursos. Este patrón indica una preferencia estratégica en la elección de ubicaciones que probablemente responde a una planificación orientada tanto a la accesibilidad como a la sostenibilidad de los asentamientos a largo plazo.

Por otro lado, los valores negativos para las variables de "coste desde fuentes de agua" (Z1 = -7.9021; Z2 = -16.839), "coste desde áreas productivas" (Z1 = -6.6; Z2 = -13.224), "coste desde rutas de tránsito históricas (Z1= −3.7699; Z2= -6.1418); y "costes desde rutas FMN" (Z1= -3.7702; Z2= -6.1862) evidencian una estrategia en la que los asentamientos tienden a localizarse próximos a estos elementos, optimizando la accesibilidad a recursos esenciales. Estos resultados refuerzan la idea de que estas comunidades priorizaron ubicaciones que no solo aseguraban su supervivencia inmediata, sino que también buscaban maximizar la disponibilidad de recursos de manera continua en un entorno potencialmente adverso.

Finalmente, los resultados de las pruebas ROC y AUC proporcionan información clave sobre la capacidad discriminatoria de cada variable para predecir la ubicación de los asentamientos. En este sentido, el valor obtenido por la variable "intensidad de fuentes de agua" (AUC = 0.8448) es el más alto entre las variables analizadas, lo que destaca su fuerte poder predictivo y confirma que el acceso a recursos hídricos fue un factor decisivo en la elección de los lugares de asentamiento. Por otro lado, el valor bajo de "coste desde fuentes de agua" (AUC = 0.1364) sugiere una relación inversa significativa entre la proximidad a las fuentes de agua y los asentamientos —i.e., los asentamientos tienden a evitar lugares con alto coste de acceso a fuentes de agua, lo cual es coherente con la lógica de proximidad a recursos hídricos. Por tanto, la combinación de estos resultados sugiere que no solo la abundancia de recursos hídricos en el entorno inmediato era importante, sino que la accesibilidad también jugaba un rol significativo. Esto reafirma la idea de que los asentamientos priorizaban áreas con acceso a fuentes de agua, subrayando la importancia de este recurso en un contexto caracterizado por su aridez.

En cuanto a los valores mostrados por otras variables, como "intensidad de áreas productivas" (AUC = 0.5980) y "coste desde áreas productivas" (AUC = 0.2148), reflejan un poder predictivo menor. Esto indica que, aunque estas variables son significativas y complementan la accesibilidad a recursos hídricos, su capacidad para discriminar por sí solas la ubicación de los asentamientos es menor. Por tanto, estos resultados señalan que, aunque la proximidad a áreas productivas era relevante, tenía un papel secundario frente a la importancia de las fuentes de agua. Por otro lado, los valores para las variables relacionadas con las rutas de tránsito históricas (AUC = 0.3663) y FMN (AUC = 0.3659) son también más bajos en comparación, lo que apunta a que estos elementos no eran tan condicionantes en la localización de

asentamientos, aunque probablemente proporcionaban ventajas adicionales de accesibilidad y movilidad. La similitud en los resultados entre rutas históricas y FMN respalda la hipótesis de que el modelo FMN es una representación razonable de los patrones de movilidad en la región de Marmárica y, por tanto, útil para inferir las posibles rutas o caminos tradicionales que habrían utilizado estas comunidades a lo largo del tiempo.

A modo de conclusión, es importante destacar que los resultados obtenidos muestran que la accesibilidad a recursos hídricos es el factor con mayor fuerza explicativa en relación con la localización y distribución de los antiguos asentamientos documentados en Marmárica. En este sentido, la consistente y fuerte relación entre la disponibilidad de agua y la ubicación de los asentamientos confirma la hipótesis inicial de que el acceso a estos recursos fue un factor clave en la organización y planificación territorial. Esto se fundamenta en el argumento de que, en entornos con recursos limitados y marcados por la aridez, el acceso al agua modela no solo las estrategias de subsistencia, sino que también condiciona la distribución y organización espacial de estas comunidades. Aunque la proximidad a áreas productivas y la accesibilidad a rutas de tránsito pudieron complementar igualmente la elección de los lugares para asentarse, la disponibilidad y accesibilidad al agua fue (y aún hoy día siguen siendo) el principal factor que modela estos paisajes norteafricanos. En consecuencia, estos resultados parecen mostrar cómo las comunidades en Marmárica se adaptaron a un entorno con recursos limitados al tiempo que transformaron ese mismo entorno para maximizar la gestión de tales recursos a largo plazo, lo que tuvo un impacto en la configuración espacial y social que marcó la evolución de estos paisajes.

Tabla 4.3. Resultados de las pruebas de K-S, Berman (Z1 y Z2) y AUC para evaluar la influencia de variables específicas y de accesibilidad sobre los patrones de distribución de los antiguos asentamientos en Marmárica.

	Covariate	Kolmogorov-Smirnov		Berman				AUC
		D	*p-value*	*Z1*	*p-value*	*Z2*	*p-value*	
Settlements	Intensity of water sources	0.65368	2.2e-16*	17.034	2.2e-16*	15.967	2.2e-16*	0.8448
	Cost from water sources	0.67706	2.2e-16*	-7.9021	2.7e-15*	-16.839	2.2e-16*	0.1364
	Intensity of productive areas	0.42350	2.2e-16*	14.565	2.2e-16*	4.4559	8.3e-06*	0.5980
	Cost from productive areas	0.49322	2.2e-16*	-6.6	4.1e-11*	-13.224	2,2e-16*	0.2148
	Cost from historical routes	0.30128	1.5e-14*	-3.7699	0.00016*	-6.1418	8,1e-10*	0.3663
	Cost from FMN routes	0.29774	3.2e-14*	-3.7702	0.00016*	-6.1862	6,1e-10*	0.3659

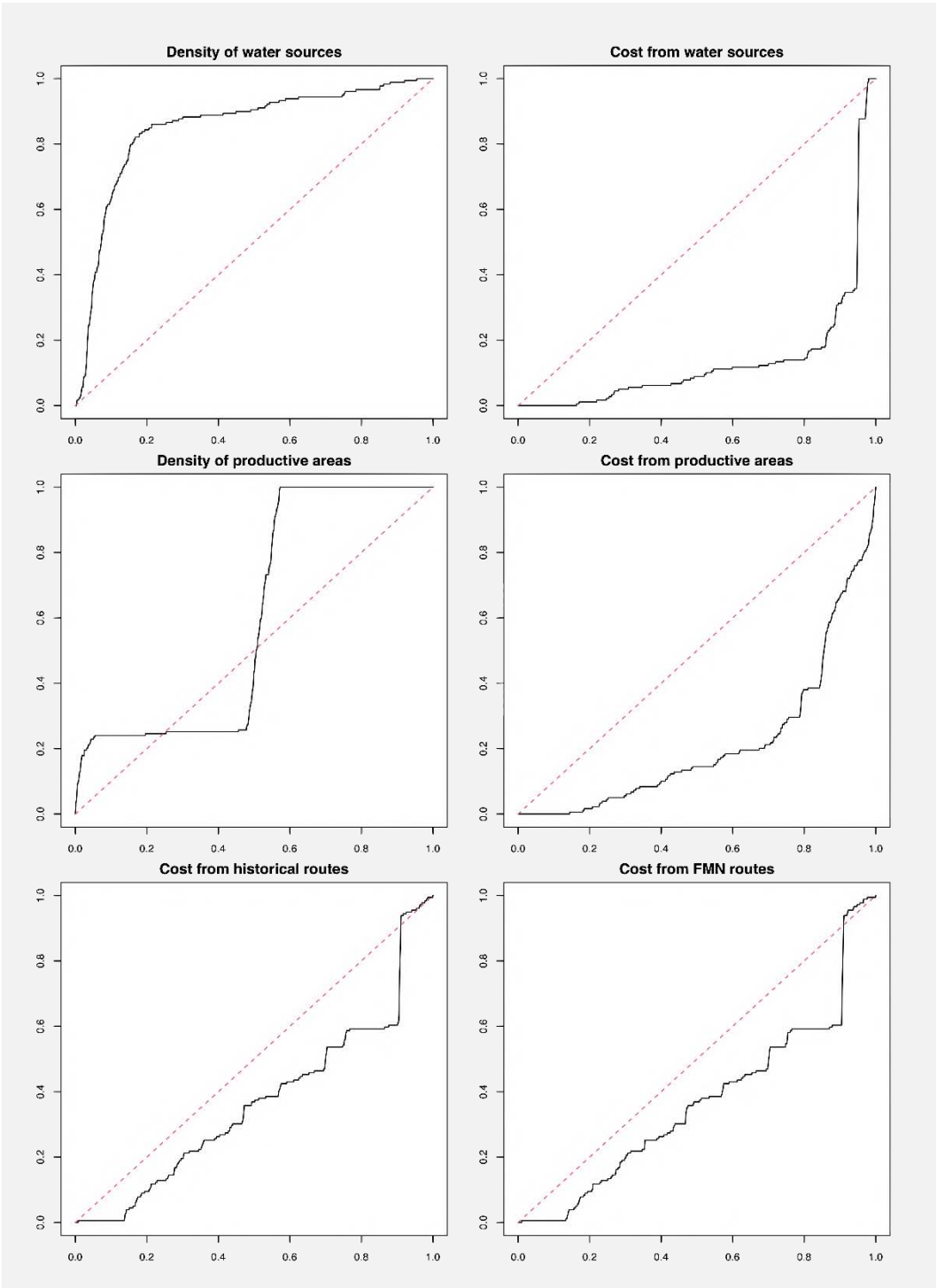


Figura 4.18. Curvas ROC que muestran la capacidad discriminatoria de las variables consideradas en este análisis. Estas incluyen la densidad y coste de acceso a fuentes de agua y áreas productivas, así como el coste de acceso a rutas históricas y simuladas (FMN). La curva ROC de cada variable representa su capacidad para predecir la presencia de asentamientos. Destacar —una vez más— la alta similitud que muestra la gráfica entre las rutas históricas documentadas y los corredores de movilidad generados mediante FMN, lo que valida la metodología empleada.

Finalmente, tal y como se ha destacado en este trabajo, uno de los objetivos complementarios de esta investigación ha sido realizar una evaluación exhaustiva de los riesgos potenciales a los que está expuesto el patrimonio arqueológico en estas regiones. Asimismo, se ha subrayado también que esta situación es particularmente crítica en el norte de África debido a la combinación de procesos medioambientales y antropogénicos únicos. Por ello, se decidió profundizar de manera exploratoria en estas cuestiones, poniendo el foco específicamente en el caso de Marmárica, con la intención de que, si estos modelos y enfoques demostraban ser efectivos, pudieran aplicarse posteriormente en otros contextos geográficos y ambientales.

Para abordar este reto, los modelos de datos generados integran variables que permiten tanto identificar y registrar los tipos de riesgos a los que están expuestos los sitios arqueológicos como evaluar su impacto potencial. De este modo, se ha podido registrar tanto zonas críticas donde las presiones del desarrollo regional son más significativas como áreas donde los factores medioambientales conducen a la rápida degradación o destrucción del patrimonio arqueológico. A continuación, se presentan los resultados de una primera aproximación cualitativa para identificar y evaluar estos riesgos potenciales en la región de Marmárica, seguida de los resultados obtenidos mediante enfoques cuantitativos, tras aplicar un modelo predictivo basado en un algoritmo de aprendizaje automático (*machine learning*) diseñado para predecir la supervivencia de estos sitios y determinar los factores involucrados en tales procesos. Para facilitar la comprensión de los resultados, se analiza en primer lugar la situación documentada en Marmárica oriental (noroeste de Egipto) y occidental (noreste de Libia), para luego realizar un análisis comparativo que ofrezca una visión general de la situación real de este estudio de caso.

Tras una primera evaluación de riesgos en Marmárica oriental, una proporción significativa de los sitios arqueológicos documentados ha sido clasificada dentro de la categoría de "alto riesgo" (*High Risk*). Esto se debe a amenazas inmediatas causadas principalmente por el desarrollo urbano (ciudades, complejos hoteleros, urbanizaciones, etc.), la intensificación agrícola (expansión de terrenos de cultivo, sistemas de irrigación, producción agrícola, etc.) y las infraestructuras de transporte (carreteras, líneas de tren, aeropuertos, etc.). Estas amenazas son especialmente significativas en las zonas septentrionales, donde los desarrollos regionales son más pronunciados. Por otro lado, la mayor parte de los sitios arqueológicos evaluados se encuentra clasificada en la categoría de "riesgo moderado" (*Moderate Risk*) debido a la presencia de amenazas medioambientales. Estas amenazas están causadas principalmente por la aridez generalizada, que contribuye a importantes procesos de erosión natural que afectan a la mayoría de estos lugares. Asimismo, estos riesgos derivan de alteraciones en las líneas de costa y otras modificaciones ambientales (p. ej., temperatura, precipitación, etc.) atribuibles al impacto creciente del cambio climático.

Por otra parte, un número considerable de estos sitios ha sido clasificado en un nivel de riesgo "bajo" (*Low*) o "indeterminado" (*Undetermined*). Esto muestra dos posibles situaciones: en algunos casos, las estructuras que permitirían la identificación del sitio no son visibles en las imágenes utilizadas; en otros, los sitios ya han sido potencialmente destruidos, una situación común en áreas críticas, especialmente en las zonas costeras donde, por ejemplo, la construcción de grandes complejos hoteleros ha modificado irreversiblemente el paisaje de estos lugares (Figura 4.19a).

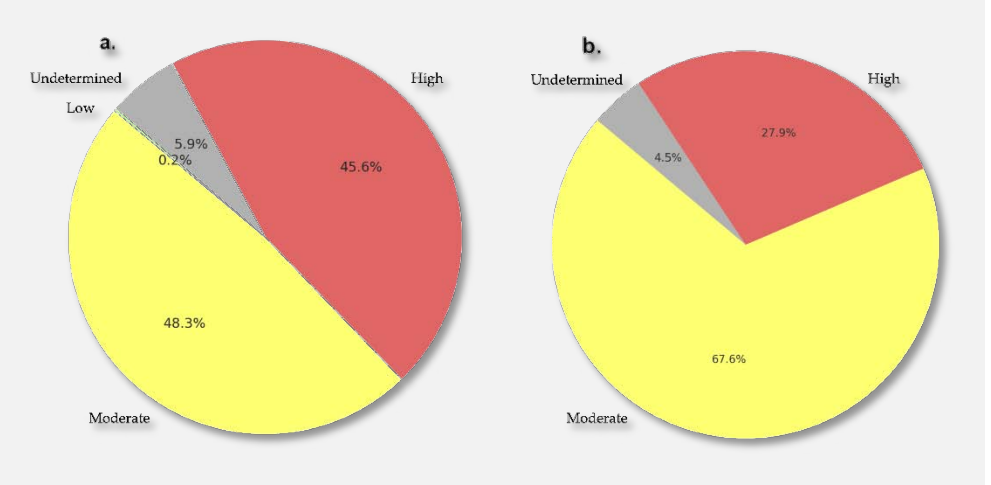


Figura 4.19. Distribución de los sitios documentados en Marmárica oriental (a) y occidental (b), con cada categoría representada en porcentaje según la escala de probabilidad de riesgo.

En cuanto a Marmárica occidental, la mayor parte de los sitios documentados fueron clasificados en la categoría de "riesgo moderado" (*Moderate Risk*), principalmente debido a procesos de erosión natural y otros factores medioambientales previamente mencionados que afectan a la conservación de estos lugares. Por otra parte, una muestra significativa se ha clasificado dentro de la categoría de "alto riesgo" (*High Risk*) debido a amenazas potenciales derivadas principalmente de factores antropogénicos, como la expansión agrícola y el desarrollo urbano, especialmente significativa en las zonas septentrionales. Por último, la existencia de sitios clasificados en la categoría de riesgo "indeterminado" (*Undetermined*) indica que, además de las situaciones anteriormente descritas, la evaluación de los riesgos potenciales resultó a veces compleja debido a la falta de datos e información en muchas de estas zonas, lo que pone de relieve, una vez más, la necesidad de realizar evaluaciones de campo (Figura 4.19b).

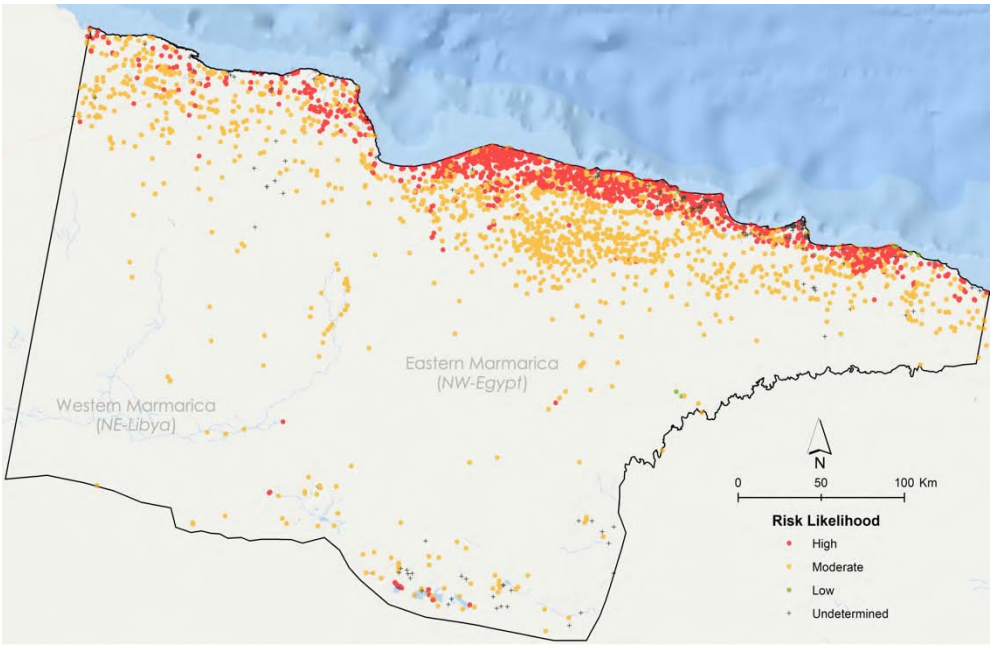


Figura 4.20. Mapa de la región de Marmárica en el que se muestran los sitios documentados en el marco de esta investigación y representados según su nivel de probabilidad de riesgo.

En un análisis comparativo entre Marmárica oriental y occidental, la distribución de los niveles de riesgo entre los sitios arqueológicos documentados presenta un escenario de características similares (Figura 4.20). Ambas regiones muestran patrones en los que los sitios están expuestos a una combinación de amenazas antropogénicas y medioambientales, siendo especialmente significativos los procesos de erosión entre estas últimas. Estos procesos afectan a una amplia variedad de sitios arqueológicos, desde aquellos situados en la costa hasta los ubicados en el interior, lo que refleja una situación de vulnerabilidad generalizada. A esto se suma el creciente impacto del cambio climático, que intensifica los procesos asociados a la erosión y otros factores medioambientales, subrayando la importancia de considerar este hecho como un factor clave en la gestión y conservación del patrimonio en esta región. Además, los factores categorizados como de alto riesgo, tales como la expansión agrícola, el desarrollo urbano y la presencia

de infraestructuras, representan los principales riesgos más inmediatos a los que están expuestos estos lugares.

Es evidente que, desde la segunda mitad del siglo XX, las zonas septentrionales de Marmárica han sido testigo de un desarrollo constante impulsado por el crecimiento de áreas urbanas, la construcción de infraestructuras de transporte e industriales, y una notable expansión de los terrenos agrícolas. Tales modificaciones en el paisaje, impulsadas por el desarrollo de la actividad humana de forma continua en el tiempo, han ejercido una presión significativa sobre el patrimonio arqueológico. No obstante, aunque ambas regiones enfrentan desafíos similares, Marmárica oriental (Egipto) muestra un desarrollo más intensivo en comparación con Marmárica occidental (Libia). Esto puede atribuirse a las diferencias en las políticas y estrategias socioeconómicas implementadas por los gobiernos de Egipto y Libia en las últimas décadas. Sin embargo, aunque el desarrollo regional parece tener un impacto más pronunciado en Marmárica oriental, la sobreexplotación de recursos como el agua extraída de los acuíferos del Sáhara, sumado a la constante inestabilidad política en el caso de Libia, sitúa al patrimonio arqueológico de ambas zonas en una situación de vulnerabilidad equiparable.

De manera similar, estos patrones generales también se observan, aunque a menor escala, en las zonas en torno a los principales oasis del interior —i.e., Al-Jaghbub en Libia; Siwa y Qara en Egipto—, donde los sitios arqueológicos identificados están expuestos a determinados riesgos debido a su proximidad a centros urbanos y terrenos agrícolas. En este contexto, el crecimiento de las actividades socioeconómicas intensivas en estos lugares representa una amenaza creciente para estos sitios. De hecho, a medida que se intensifica la

explotación de los recursos, ya sea mediante la agricultura o las explotaciones salinas, como en el caso de Siwa, aumenta la vulnerabilidad de estos lugares, lo que podría acelerar su deterioro si no se aplican políticas de gestión adecuadas. A ello hay que sumar que la proximidad a zonas urbanas y agrícolas no solo expone a riesgos directos, sino que también los hace vulnerables a efectos indirectos, como alteraciones en los sistemas hidrológicos, acumulación de desechos y cambios en el uso de la tierra, factores que también tienen un impacto directo en su supervivencia.

Finalmente, esta primera evaluación exhaustiva del patrimonio arqueológico y cultural en la región de Marmárica ha revelado un escenario en el que los sitios arqueológicos documentados se encuentran en una situación de vulnerabilidad generalizada debido a una combinación de factores antropogénicos y medioambientales. Siendo en ambas regiones los impactos del desarrollo regional y los procesos de erosión natural los que tienen una mayor significación: el primero, más pronunciado en las zonas septentrionales y, el segundo, vinculado a las condiciones de aridez generalizada a medida que avanzamos hacia zonas más meridionales. No obstante, a pesar de estos resultados tangibles, esta sigue siendo una evaluación cualitativa inicial. Por lo tanto, surge la necesidad de complementar estos resultados mediante enfoques cuantitativos que faciliten la generación de modelos que puedan guiar futuras estrategias de investigación centradas en la gestión y protección del patrimonio arqueológico y cultural en estas regiones.

Por lo tanto, se detallan a continuación los resultados obtenidos tras la aplicación de un modelo probabilístico diseñado para evaluar el impacto de las acciones antropogénicas regionales y las condiciones medioambientales en

la desaparición gradual del patrimonio arqueológico en la región de Marmárica. En primer lugar, como se ha destacado en este capítulo, el modelo emplea la prueba de fuerza del arco (*arc strength test*) para cuantificar la relación entre cada par de variables analizadas. En este sentido, la Tabla 4.4 presenta los resultados de estas evaluaciones, mostrando las relaciones significativas entre cada par de variables consideradas. Estos resultados evidencian de forma preliminar que la supervivencia de los sitios arqueológicos está vinculada con factores como la tipología del sitio (*Type of site*), la zona ecológica (*Ecological zone*) en la que se encuentra, el grado de salinización del suelo (*Soil salinization*) y los valores de enraizamiento (*Soil rooting*).

Tabla 4.4. Se detallan los resultados de la fuerza del arco (*arc strenght test*) del modelo de red bayesiano que explora la relación entre la supervivencia y las características del paisaje. Se observa que la variable "*Survival*" está relacionada con "*Type of site*", "*Soil rooting*", "*Ecological zone*" y "*Soil salinization*". Las variables no representadas en la tabla no tienen una relación significativa con la supervivencia.

Variables related		***p*-value**
Survival	Type	1,91E-295
NEAR_Coast	Barren_Land	1,26E-286
Eco_Zone	NEAR_City	8,27E-279
Barren_Land	Cultivated_Land	1,98E-272
Barren_Land	Type_Land	1,15E-249
CV_Precip	CV_Temp	3,08E-246
Barren_Land	Annual_Precip	4,63E-207
Soil_Nutrient	CV_Precip	1,26E-194
Soil_Nutrient	Annual_Precip	3,55E-186
Eco_Zone	NEAR_Inlandwater	8,96E-172

NEAR_Coast	Type_Land	1,05E-170
Soil_Nutrient	Type_Land	3,80E-160
Soil_Nutrient	Cultivated_Land	3,19E-147
NEAR_Inlandwater	Built_Land	4,34E-140
Soil_Workability	Barren_Land	1,97E-138
CV_Precip	Annual_Temp	8,07E-123
Zone	Annual_Temp	1,79E-98
Type_Land	Elevation	6,23E-94
Annual_Temp	Annual_Precip	5,93E-82
Annual_Temp	CV_Temp	7,57E-52
Type_Land	CV_Precip	1,97E-47
NEAR_Coast	Type	4,87E-47
Zone	NEAR_City	3,01E-40
Type_Land	Built_Land	2,70E-32
CV_Precip	Zone	6,26E-31
CV_Precip	Type	4,76E-23
Survival	Soil_Rooting	3,30E-22
Annual_Temp	Slope	5,05E-18
Cultivated_Land	NEAR_Inlandwater	1,43E-16
Annual_Precip	NEAR_Route	1,60E-16
Survival	Eco_Zone	1,32E-13
Cultivated_Land	Slope	3,04E-11
Survival	Soil_Salinisation	3,05E-11

Al analizar la proporción relativa entre "supervivencia" y "no supervivencia" en función de la tipología de los sitios, los resultados indican que ciertos sitios son más propensos a no sobrevivir. Por ejemplo, se observa que un 80% de los "lugares productivos" y un 53% de los "asentamientos" no han sobrevivido, mientras que el resto tienen una probabilidad significativamente menor de no supervivencia: 2% para los "lugares de enterramiento" y 0,8% para las "zonas de captación de agua". Es importante destacar que estos resultados pueden estar afectados por la posible sobrerrepresentación de "lugares de enterramiento" y "zonas de captación de agua" en la base de datos. Esto se debe a que, debido al carácter seminómada de las poblaciones que habitaron Marmárica, es sumamente complejo identificar estructuras arqueológicas que representen asentamientos permanentes. Esta dificultad podría explicar en parte la baja tasa de detección y supervivencia observada en los asentamientos, en comparación con otro tipo de sitios, como los lugares de enterramiento o las zonas de captación de recursos hídricos, que tienden a ser más fácilmente identificables y, por tanto, mejor representadas en nuestro conjunto de datos.

Por otro lado, cuando exploramos la posible relación entre "supervivencia" y "zonas ecológicas", los resultados no muestran que los asentamientos situados en determinadas zonas tengan una probabilidad significativamente mayor de sobrevivir (con tasas de supervivencia entre el 88% y el 99% en todas las zonas), sino que se localizan (o identifican) más asentamientos en determinadas zonas ecológicas. Específicamente, un 55% de todos los asentamientos identificados se localizan en la zona costera (*Coastal zone*) y un 23% en la meseta norte (*Northern tableland*). El resto de las zonas presentan un patrón de asentamiento más disperso. Esta alta concentración de asentamientos en las zonas septentrionales podría haber llevado al modelo de

red bayesiano a identificar una fuerte asociación entre estas zonas ecológicas y la probabilidad de supervivencia, dado que la mayoría de los asentamientos están situados en esta área. Estos patrones de distribución geográfica también se corroboran al analizar las localizaciones específicas de los sitios arqueológicos (Figura 4.21 y Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Distribución relativa de tipología de sitios arqueológicos por zonas geográficas.

Type of site	Geographical Zone	Relative proportion (%)
Burial place	Central plateau	3.89
	Coast north	39.12
	Desert plateau	5.05
	North plateau	34.49
	Oasis	2.63
	Pre-plain	14.83
Productive area	Central plateau	12.12
	Coast north	62.12
	North plateau	4.55
	Oasis	12.12
	Pre-plain	9.10
Settlement	Central plateau	13.41
	Coast north	66.48
	Desert plateau	1.68
	North plateau	10.06
	Oasis	7.26
	Pre-plain	1.12
Water place	Central plateau	1.62
	Coast north	59.79
	Desert plateau	3.20
	North plateau	20.04
	Oasis	1.95
	Pre-plain	13.40

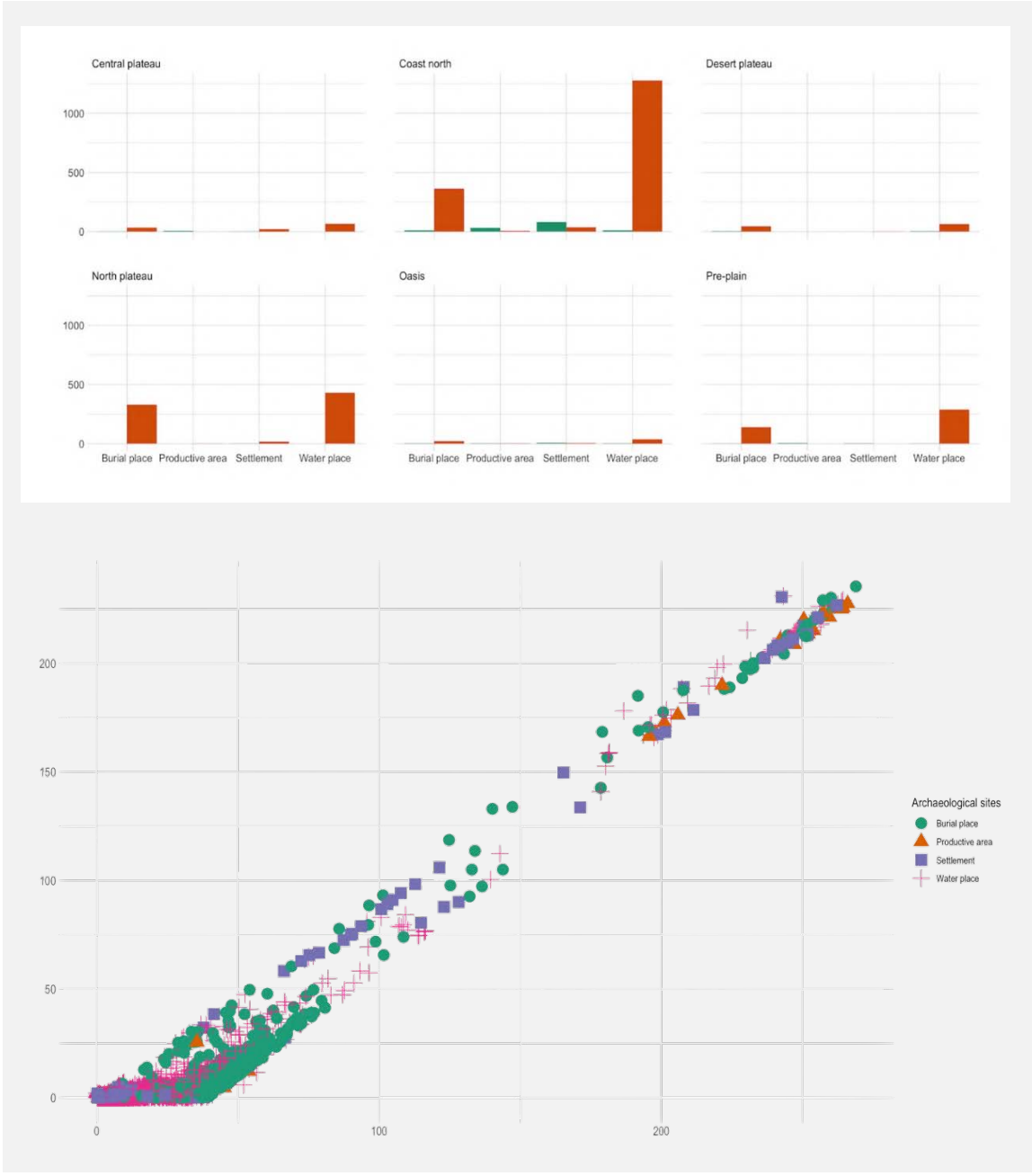


Figura 4.21. (*Arriba*) Distribución de los tipos de sitios arqueológicos registrados en las distintas zonas geográficas, categorizados según su supervivencia: en color verde, aquellos sitios que ya han desaparecido, y en color naranja, los sitios que han sobrevivido. (*Abajo*) Relación entre las diferentes tipologías de sitios arqueológicos. Se observa una concentración significativa en las zonas septentrionales, ubicadas principalmente en un rango de entre 0 y 40 km de distancia desde la costa.

En el caso de las propiedades del suelo, según los resultados de la prueba de resistencia del arco (*arc strenght test*), variables como el "enraizamiento de suelo" (*Soil rooting*) y "salinización del suelo" (*Soil salinization*) están asociadas a la probabilidad de supervivencia; sin embargo, si se explora en detalle esta relación midiendo la proporción relativa de cada par de valores de estas variables con la supervivencia, no se identifican diferencias significativas. Aproximadamente, el 90% de los sitios arqueológicos han sobrevivido en todas las categorías de "enraizamiento del suelo" (*Soil rooting*), y entre el 75% y el 90% han sobrevivido en todas las categorías de "salinización del suelo" (*Soil salinization*) (a excepción de la categoría 4 de salinización, donde la proporción de supervivencia es notablemente menor, situándose en un 60%). Estos resultados parecen evidenciar que, aunque las propiedades del suelo, como el enraizamiento y la salinización, están vinculadas a la supervivencia de los sitios, su impacto puede no ser tan directo o significativo como el de otras variables.

Por otro lado, al explorar las interrelaciones entre todas las variables analizadas mediante la representación gráfica en el modelo de red bayesiana construido con el enfoque de ABM (*Augmented Naïve Bayes*), se observó una fuerte relación entre la "supervivencia" (*Survival*) de los sitios arqueológicos y variables como la "tipología del sitio" (*Type of site*) y las "zonas ecológicas" (*Ecological zones*) (Figura 4.22). Además, el modelo de red bayesiana muestra como otras variables, aunque relacionadas con la supervivencia, lo hacen de manera más compleja y no lineal. Este tipo de influencia implica que, aunque no tan evidentes, estas variables también juegan un papel relevante en la configuración de la probabilidad de supervivencia. Particularmente, se destaca la interrelación entre características del suelo específicas, como la "trabajabilidad" —i.e., idoneidad o capacidad de uso del suelo— los

nutrientes y la toxicidad, que dependen significativamente de la zona ecológica. Esta interdependencia señala que las características del suelo, condicionadas por aspectos ecológicos, son cruciales para entender las dinámicas de los sitios arqueológicos en esta región. De este modo, los resultados obtenidos apuntan a que factores ecológicos y edáficos —i.e., relacionados con las propiedades del suelo— combinados pueden influir significativamente en la estabilidad y preservación del patrimonio arqueológico.

En cuanto a las predicciones realizadas por el modelo, se procedió a evaluar su capacidad predictiva seleccionando una muestra aleatoria de 50 casos del conjunto de datos. En este sentido, el modelo demostró una precisión significativa, prediciendo correctamente la supervivencia o no de los sitios en el 97,5% de los casos. En los pocos casos en que el modelo no pudo realizar una predicción, este indicaba que la información era "no disponible" (*Not available*, NA), mostrando un nivel de confianza del 0%. Este resultado es significativo, ya que el modelo no produce predicciones incorrectas; si no es capaz de predecir con certeza, simplemente no ofrece un resultado. Este comportamiento es muy positivo, lo que permite afirmar con un alto nivel de confianza que el modelo es capaz de predecir la probabilidad de supervivencia de los sitios arqueológicos, lo que demuestra que las variables introducidas y los métodos utilizados para construir el modelo son adecuados para este tipo de análisis haciendo de estos modelos un recurso útil para la evaluación de los riesgos y la gestión del patrimonio en esta región norteafricana.

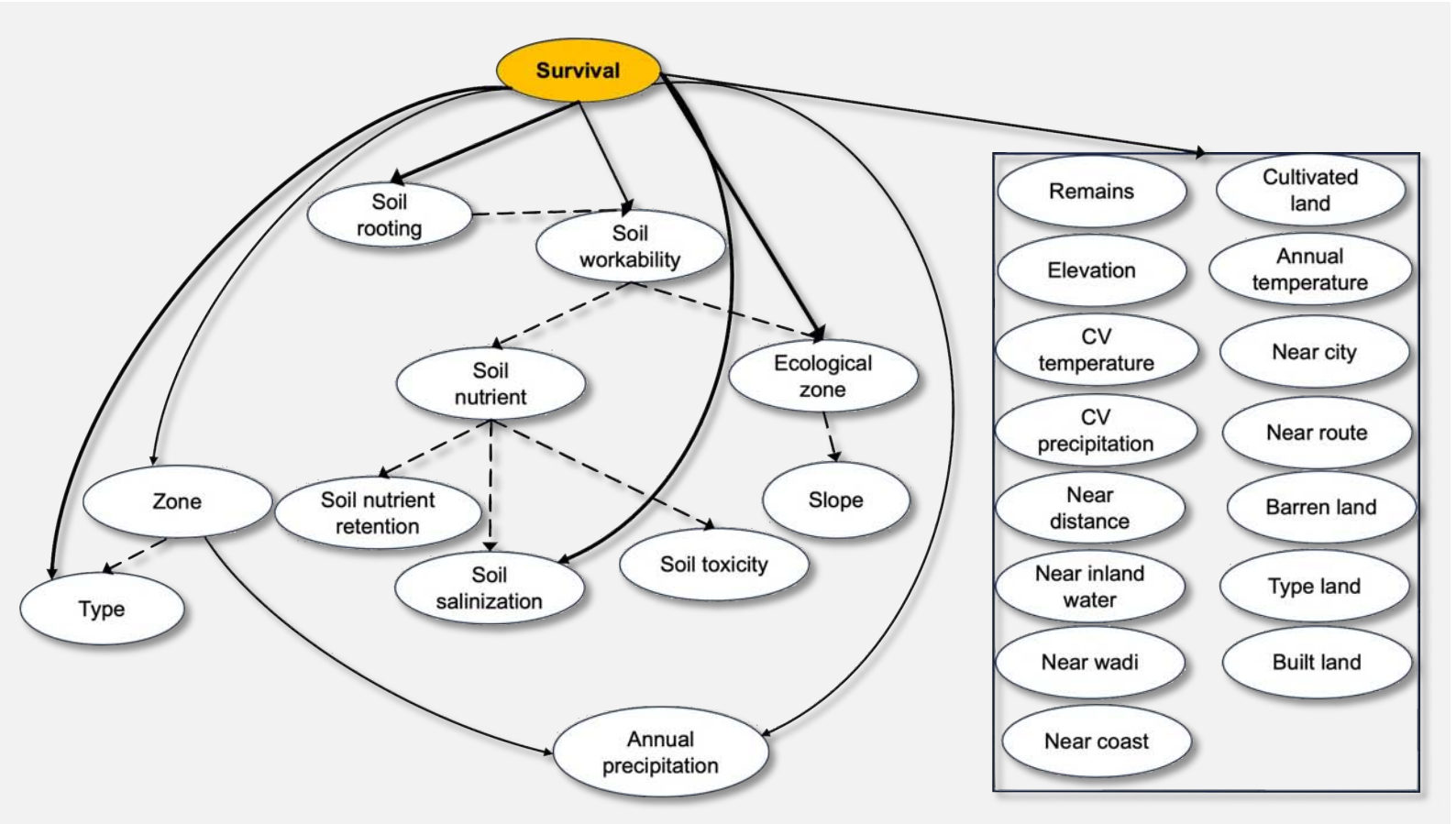


Figura 4.22. Modelo de red bayesiana que muestra la probabilidad de supervivencia en función de las condiciones del paisaje en Marmárica. El modelo representa los vínculos más fuertes con la "supervivencia" (*Survival*) mediante enlaces continuos, y las interrelaciones entre las variables de entrada mediante enlaces discontinuos. Se observa que las variables relacionadas con las características del suelo están estrechamente interconectadas, mientras que las condiciones de tipo ambiental se vinculan con una amplia gama de variables, como la topografía y la distancia a elementos geográficos.

En definitiva, este modelo tiene la capacidad de proporcionar información valiosa sobre las posibles causas subyacentes a la supervivencia de los sitios arqueológicos, destacando su capacidad predictiva para identificar las variables que aumentan la probabilidad de degradación y desaparición de antiguos asentamientos, lugares de enterramiento, áreas productivas y zonas históricas de captación de recursos. En particular, el modelo ha revelado una relación no lineal significativa, en la que la supervivencia está predominantemente influida por factores clave como la tipología del sitio, la zona ecológica y las propiedades del suelo. En este último caso, el análisis indica que estas propiedades tienen un impacto indirecto pero significativo en las tasas de supervivencia, siendo especialmente relevantes en un entorno como Marmárica, caracterizado por su aridez, que provoca procesos de erosión natural generalizada que afectan a la mayoría de estos lugares.

Por lo tanto, los resultados muestran una compleja dinámica de interrelación entre factores humanos y no humanos que desempeñan un papel clave en la conservación de los sitios arqueológicos. Además, es importante destacar que este tipo de modelo puede ser "reentrenado" si se recogen nuevos datos en esta región, lo cual es fundamental dada la naturaleza poco estudiada de Marmárica. Por este motivo, priorizamos la aplicación del modelo predictivo en este estudio de caso de una forma exploratoria, ya que el principal objetivo era proporcionar un marco metodológico que pueda orientar futuras estrategias de investigación centradas en la protección del patrimonio y los esfuerzos de conservación, especialmente en áreas vulnerables y con datos limitados. Asimismo, los enfoques digitales empleados para el registro y almacenamiento de la información, son esenciales para una gestión eficaz, mejorando la documentación y facilitando la preservación (digital) de este patrimonio.

V

PAISAJES EN MOVIMIENTO – (RE)CONSTRUYENDO REDES *&* DINÁMICAS SOCIALES

V

PAISAJES EN MOVIMIENTO - (RE)CONSTRUYENDO REDES & DINÁMICAS SOCIALES

5.1 INVESTIGACIÓN DE REDES EN ARQUEOLOGÍA

5.1.1 Movilidad, Rutas y Redes

Tal y como se destacó en el marco teórico de este trabajo, el movimiento trasciende el simple acto físico de desplazarse, ya que también tiene implicaciones conceptuales vinculadas a cómo los humanos perciben y experimentan el entorno. Esto se debe a que las sociedades siempre han interactuado de manera dinámica con su entorno, donde el movimiento, como componente esencial de la interacción, juega un papel clave en la configuración y conexión entre diferentes lugares, y está íntimamente relacionado con cómo se explora y comprende el paisaje (véase Cap. II, 2.1.2 Una Arqueología de la Interacción) (Ingold, 1992, 2011; Llobera, 2000). Desde la perspectiva de la investigación arqueológica, si se caracteriza a las sociedades del pasado a partir de su materialidad, entonces los senderos, caminos y rutas históricas constituyen la manifestación más directa y tangible de estos procesos de interacción (Cummings & Johnston, 2007; Gibson, 2007; Snead, Erickson & Darling, 2011; Fábrega-Álvarez, 2016). Como afirma Rebecca Solnit, "Un camino es una interpretación previa de cómo desplazarse a través del paisaje, y seguir una ruta implica aceptar dicha interpretación [...]". De esta manera, Solnit destaca que los caminos no solo facilitan el desplazamiento, sino que representan decisiones e interpretaciones propias de un individuo o comunidad, las cuales pueden variar en función del contexto temporal, espacial y social. Y continúa "recorrer el mismo camino es reiterar [...]; desplazarse por el mismo lugar de la misma forma es un medio

de convertirse en la misma persona, de compartir los mismos pensamientos..." (Solnit, 2000: 68). Esta idea también subraya el hecho de que estas acciones tienen un componente identitario que define a determinados individuos o grupos, ya que recorrer un camino implica seguir la experiencia de otros y, por tanto, participar de una tradición social y cultural compartida. Además, estas acciones repetidas en el tiempo han dejado diferentes huellas e impactos en el paisaje, que ahora pueden rastrearse y ofrecen una ventana para comprender cómo estas sociedades transitaron y moldearon activamente el paisaje a lo largo del tiempo (Llobera, 2020). En este capítulo, se exploran los enfoques y aproximaciones adoptados para rastrear y comprender tales patrones y su impacto en el paisaje. Para ello, se detallan cada uno de los procedimientos utilizados con los que conceptualizar, reconstruir y evaluar estructuras y redes de movilidad históricas, con el fin de entender mejor las relaciones y conectividad multiescalar que moldearon los paisajes y las interacciones sociales de las comunidades analizadas.

Cuando se trata de adentrarse en el estudio de los patrones de movilidad y redes de interacción en una determinada región, resulta inevitable pensar en las características y particularidades propias del entorno. En este sentido, existe un concepto clave conocido como "*affordances*", el cual fue acuñado por el psicólogo James Gibson en 1977 como un neologismo basado en el verbo "*to afford*" (permitir, brindar, ofrecer o proporcionar algo) y que puede interpretarse como "potencialidades del entorno". Este término hace referencia a las posibilidades que un entorno ofrece a un individuo o grupo de individuos en función tanto de sus características como de las propias capacidades de estos grupos (Gibson 1977, 1979; Verhagen, Nuninger *&* Groenhuijzen, 2019: 218). Esta "potencialidad" corresponde, en el sentido amplio del término, a lo que el entorno puede ofrecer, tanto a nivel de

oportunidades como de limitaciones, concibiéndolo no solo como un conjunto de características físicas objetivas y neutras, sino como un sistema de posibilidades que ejerce su influencia a la vez que es influenciado por las acciones de quienes lo habitan. Así pues, solo al considerar la relación recíproca entre el entorno (natural y cultural) y la capacidad de los individuos (que incluye tanto aspectos técnicos como sociales), podemos comprender plenamente cómo se estructuran y desarrollan los procesos que moldearon los paisajes observados (Verhagen, Nuninger & Groenhuijzen, 2019: 219).

La base epistémica de esta argumentación radica en que es posible acercarnos a comprender tales dinámicas si se consideran tanto factores vinculados con el entorno natural como con indicadores indirectos de actividad humana (Llobera, 2000). De esta forma, es posible reconstruir aspectos relacionados con la movilidad, la accesibilidad o definir rutas históricas que conectaban y articulaban diversas ubicaciones (sitios arqueológicos) a diferentes escalas espaciales y temporales. De hecho, estas aproximaciones han sido objeto de un intenso debate, caracterizado por un gran número de estudios desde finales de la década de 1980, dentro de marcos como la arqueología espacial y, más adelante, desde la propia arqueología del paisaje (Fábrega-Álvarez, 2016: 162). Esta tendencia continuó su desarrollo durante la década de 1990, cuando el continuo avance tecnológico introdujo nuevas posibilidades de cálculo y representación a partir de modelos digitales basados en determinadas variables espaciales. Y, sobre todo, se consolidó a partir de la década del 2000 con la aparición de numerosos estudios que se fundamentan en gran medida en métodos y técnicas basados en SIG. Algunos ejemplos representativos fueron varios de los trabajos publicados en la monografía *Beyond the map: archaeology and spatial technologies* (Llock, 2000; Bell & Lock, 2000; Harris, 2000; Llobera, 2000); *Geoglyphs and GIS: modelling transhumance*

in northern Chile (Jenson, Doerr *&* Sarris, 2003); *Moving without destination. A theoretical GIS based determination of movement from a giving origin* (Fábrega-Álvarez, 2006); *Using multi-criteria cost surface analysis to explore past regional landscapes* (Howey, 2007); *Order in movement: a GIS approach to accessibility* (Llobera, Fábrega-Álvarez *&* Parcero-Oubiña, 2011); *Movimiento, circulación y caminos en el paisaje digital. La aplicación de los SIG en el estudio arqueológico de los desplazamientos humanos* (Grau Mira, 2011); *Geospatial modeling of pedestrian transportation networks: a case study from precolumbian Oaxaca, Mexico* (White *&* Barber, 2012); *On the road to nowhere? Least cost paths, accessibility and the predictive modelling perspective* (Verhagen, 2013); *Computational Approaches to the study of Movement in Archaeology* (Polla *&* Verhagen, 2014); o *Memory at your feet: Modeling the agency of past trails* (Llobera, 2020); entre otros.

A pesar del potencial de estas aproximaciones, como cualquier otro enfoque computacional, estas aplicaciones enfrentan limitaciones, particularmente debido a la dificultad de capturar, a partir de registros fragmentarios, la complejidad inherente a las dinámicas que han dado forma a los paisajes. No obstante, su verdadero potencial radica en la capacidad de modelar el movimiento, la accesibilidad mediante superficies de coste y/o la reconstrucción de rutas óptimas o corredores históricos de movilidad, considerando diversos factores tanto humanos como no humanos. Sin embargo, todos estos elementos son solo algunos aspectos dentro del conjunto de factores que deben ser considerados. Para reconstruir estas dinámicas es necesario comprender no solo las "potencialidades" que ofrece el entorno, sino también adoptar una mirada interna, es decir, entender el paisaje desde la perspectiva de las sociedades que lo habitaron, para así poder comprender los procesos cognitivos y sociales que guiaron tales dinámicas. En este punto, es fundamental adoptar un enfoque de red, ya que, como se ha señalado, estos

procesos de interacción son inherentemente dinámicos, distribuidos y abarcan una multiplicidad de factores. Esto implica la necesidad de un enfoque analítico que metodológicamente sea capaz de abordar la complejidad inherente a las relaciones sociales, económicas y culturales de estas sociedades (Knappett, 2011; Kohler, 2012; Tartaron, 2013; Knodell, 2021).

5.1.2 Conceptualización de "redes espaciales"

A lo largo de este trabajo, se ha señalado en varias ocasiones que la aplicación de un enfoque basado en redes permite, en esencia, describir y analizar cómo diferentes entidades están conectadas o relacionadas entre sí. Estas entidades pueden representar sitios, materiales arqueológicos, individuos, objetos, etc., y el análisis de sus relaciones permite construir un marco que revela cómo están organizadas e interconectadas dentro de un sistema. En este contexto, una categoría que ha ganado especial atención en el ámbito arqueológico en los últimos años son las denominadas "redes espaciales" (*spatial networks*) (Brughmans *&* Peeples, 2020, 2023). En estas redes, las conexiones entre nodos no solo están determinadas por aspectos sociales o culturales, sino también por la disposición física de estos elementos en el espacio geográfico (Brughmans *&* Peeples, 2020: 273). Esto implica que la forma en que los nodos se conectan depende de variables como la proximidad, la accesibilidad, las características topográficas o el ámbito de influencia. Este enfoque resulta especialmente útil dentro de este marco de investigación, ya que permite estudiar patrones de distribución, rutas e interacciones entre comunidades. Por lo tanto, la dimensión espacial y contextual que ofrecen estas redes es fundamental para proporcionar una visión más holística, ayudando a comprender cómo los factores geográficos desempeñan un papel esencial en las relaciones entre entidades.

Este tipo de enfoques tienen una larga tradición en arqueología, de hecho, muchas de las primeras aplicaciones se basaron en herramientas para analizar redes geográficamente explícitas con el fin de explorar patrones y sistemas de intercambio (Doran & Hodson, 1975; Hodder & Orton, 1976; Terrell, 1977; Irwin, 1978). No obstante, a pesar de estos esfuerzos iniciales, no ha sido hasta las últimas dos décadas que estas aproximaciones se han consolidado dentro de la disciplina arqueológica (Isaksen, 2008; Knappett, Evans & Rivers, 2008, 2011; Jiménez-Badillo, 2012; Bevan & Wilson, 2013; Collar *et al.*, 2015; Brughmans & Peeples, 2017, 2020, 2023; entre otros). Dentro del espectro de aplicaciones, algunos de los ejemplos más representativos se pueden observar al estudiar rutas de transporte, incluidos los ríos navegables y las rutas marítimas, ya que todos estos elementos pueden conceptualizarse como redes espaciales. En particular, un ejemplo pionero se encuentra en el estudio de Leif Isaksen (2008) sobre el sistema de transporte romano en la provincia de la Bética, en el sur de la península ibérica. Este estudio se basó en diversas fuentes, que incluyen rutas documentadas tanto a través de la evidencia material como de fuentes textuales (p. ej., los vasos de Vicarello, el Itinerario Antonino y la Cosmografía de Rávena), así como los tramos navegables de los ríos Genil y Guadalquivir. En su modelo, los asentamientos romanos distribuidos a lo largo de estas rutas se representaron como nodos, y cada uno de ellos se conectó con otros por medio de enlaces siempre que al menos una fuente indicara que se podía viajar entre ellos. Esta representación de red permitió no solo estudiar la estructura de las fuentes, sino también resolver cuestiones sobre su propio funcionamiento, como: ¿qué ruta se podría haber seguido para viajar de Corduba a Gades, y cuánto tiempo y recursos eran necesarios? (véase Carreras & De Soto, 2013; De Soto, 2019; De Soto & Carreras, 2021, para otros ejemplos de estas aplicaciones). Igualmente, una representación de esta idea aplicada a diferentes contextos y escalas de

análisis puede explorarse en ORBIS, *Stanford Geospatial Model of the Roman Empire* (Scheidel, 2014). Este proyecto simula la red de transporte del Imperio Romano integrando rutas terrestres, fluviales y marítimas para proporcionar una representación dinámica de cómo se movían las personas, bienes e ideas a través del territorio controlado por Roma durante su etapa de máxima expansión. Este modelo tiene en cuenta factores como la topografía, la estacionalidad, las condiciones climáticas y los costes de transporte, permitiendo a los usuarios calcular rutas y analizar la conectividad y accesibilidad entre diversas regiones (Brughmans & Laguna-Palma, 2023: 18).

La aplicación de este tipo de redes resulta especialmente útil cuando las preguntas y objetivos de investigación se centran en aspectos asociados a la distribución y las relaciones espaciales de determinadas entidades (Brughmans & Peeples, 2020, 2023). Este enfoque permite no solo mapear las interacciones sociales, sino también comprender cómo las características del entorno —como la geografía, la hidrología o la topografía— influyen en dichas interacciones. En este contexto, existen varios supuestos que respaldan el uso de redes espaciales en arqueología:

(i) Cuando la disposición espacial de los nodos (p. ej., los asentamientos) puede condicionar el tipo y la frecuencia de las interacciones. Por ejemplo, si dos asentamientos se encuentran cerca uno del otro mediante una ruta de transporte, es más probable que desarrollen relaciones más fuertes que otros asentamientos más alejados.

(ii) El entorno como un factor condicionante. Los factores geográficos y ambientales pueden influir en la ubicación y distribución espacial de las entidades, afectando a aspectos como la accesibilidad y, por tanto, las

conexiones entre ellas. El entorno natural, en muchas ocasiones, define las rutas de comunicación y acceso entre asentamientos. Por ejemplo, un territorio muy accidentado, como en el caso de Creta, podría limitar las interacciones entre comunidades o tener un impacto en la frecuencia entre ellas.

(iii) La combinación de factores relacionados con el entorno natural y con las actividades humanas. La interacción entre los factores físicos y las relaciones dentro de la red puede producir comportamientos emergentes o patrones específicos. Por ejemplo, una zona portuaria puede atraer rutas comerciales y conexiones directas, lo que a su vez genera dinámicas socioeconómicas particulares en esa región. En este caso, las condiciones geográficas y las actividades humanas se combinan para formar nodos clave en la red, influyendo en la estructura y el comportamiento del sistema.

Todos estos supuestos incluyen factores no solo relacionados con la disposición física de las entidades y sus conexiones a través del entorno, sino también por la influencia de determinadas actividades (razones socioeconómicas) que impactan en los procesos de interacción. Esto implica que las relaciones dentro de la red no son independientes, sino que están condicionadas por relaciones de interdependencia entre factores de distinta naturaleza. Además, al combinar enfoques de redes espaciales con técnicas de análisis espacial, se obtiene una visión mucho más completa de los procesos que determinan la organización y el desarrollo de estas comunidades. Esto no solo facilita la identificación de patrones espaciales de interacción, sino que también permite generar hipótesis sobre cómo determinados factores socioeconómicos, geográficos o ecológicos impactaron en la evolución y configuración de estas sociedades.

5.1.3 Desde lo local a lo global: una aproximación multiescalar

Podría decirse que la comprensión arqueológica de los procesos de interacción se sustenta sobre dos principios fundamentales: estos se desarrollan en el paisaje y operan a través de diversas escalas, desde lo local hasta lo global. Sin embargo, dentro de los sistemas complejos, se producen muchos tipos y niveles de interacción, lo que plantea un desafío cuando se trata de explorar su estructura, ya que la escala es clave para entender las dinámicas sociales (véase Cap. II, *Escala*). Por ello, en lugar de intentar definir *a priori* lo local y lo global, lo próximo y lo lejano, es más útil centrarse en las topologías que organizan (o desorganizan) tales dinámicas, considerando los procesos por los cuales tanto lo local como lo global se configuran e influencian activamente (Knappett, 2011).

Es por esto que resulta necesario adoptar una aproximación multiescalar, que permita comprender cómo las dinámicas a nivel micro, meso y macro se interrelacionan e influyen mutuamente. El empleo de redes espaciales es particularmente útil en este sentido, ya que ofrece la capacidad de abstraer la complejidad de las interacciones mediante la representación de la estructura y las conexiones de sus componentes fundamentales teniendo en cuenta el contexto donde se desarrollan (Brughmans *&* Peeples, 2020, 2023). Esto es particularmente valioso para comprender tales procesos y su impacto en las sociedades estudiadas, revelando cómo las condiciones locales se entrelazan con las dinámicas interregionales, influyendo de manera significativa en aspectos socioeconómicos y/o culturales.

Otro aspecto fundamental es cómo los métodos de redes permiten aplicar una serie de métricas que posibilitan examinar estas estructuras en mayor detalle,

revelando características específicas a diferentes niveles y escalas de análisis. Estas métricas, derivadas de la ciencia de redes, cuando se utilizan en redes espaciales, muestran configuraciones y atributos únicos desde la escala local, que describen la estructura de pequeños conjuntos de nodos y sus conexiones, hasta medidas a escala global, que reflejan propiedades estructurales de la red en su conjunto (Brughmans & Peeples, 2023; Brughmans *et al.*, 2023; Jiménez-Badillo, 2023). El procedimiento más habitual para explorar estas variantes espaciales consiste en evaluar la distancia física entre los nodos o cualquier otro atributo derivado de la fortaleza de las conexiones (enlaces) como, por ejemplo, el nivel de flujo (intensidad) para definir su conectividad. Como se detallará a continuación, algunas de estas métricas son el grado de centralidad, que mide la importancia de un nodo o enlace dentro de la red; la cercanía, que evalúa cómo de rápido se puede acceder a otros nodos o enlaces; y la intermediación, que indica cuantas veces un nodo o enlace actúa como intermediario de otros, reflejando su papel para conectar distintas partes de la red (Freeman, 1979; Barthelemy, 2011).

En definitiva, esta perspectiva permite concebir el paisaje como una red dinámica de relaciones entre diversos componentes que se combinan para influir en las dinámicas sociales, proporcionando un marco para entender la complejidad de las interacciones humanas a diferentes escalas espaciales y temporales. Esto implica ir más allá de una concepción estrictamente espacial y física de los procesos de interacción, para concebirlos como construcciones sociales, donde las relaciones son activas y están en constante evolución.

5.2 TÉCNICAS DE (RE)CONSTRUCCIÓN DE REDES

Cómo se ha mencionado anteriormente, uno de los métodos más comunes para representar redes espaciales en investigación arqueológica es mediante elementos formales como rutas, caminos o corredores históricos de movilidad, a partir de los cuales se pueden explorar y analizar flujos de comunicación e intercambio entre diversas comunidades. En este estudio, se ha adoptado este enfoque donde los nodos representan antiguos asentamientos, sitios arqueológicos o puntos clave de conexión, mientras que los enlaces definen las relaciones entre ellos. En algunos casos, las conexiones representan elementos físicamente identificables, como rutas, caminos o corredores, donde los enlaces poseen un componente espacial claro y tangible (Isaksen, 2007, 2008; Menze *&* Ur, 2012; Pailes, 2014). En otros casos, las conexiones entre pares de nodos se definen mediante relaciones espaciales, como la proximidad a través del entorno o regiones de influencia (Knappett, Evans, *&* Rivers, 2008; Bevan *&* Wilson, 2013; Verhagen *et al.*, 2013; Hill *et al.*, 2015; Rodríguez-Rellán *et al.*, 2023). Este enfoque se implementa mediante un marco de estudio secuencial donde el empleo de métodos y herramientas basados en SIG (ArcGIS v.10.5), se combina junto con la aplicación de software de representación y análisis de redes (Visone v.2.24.1).

Dentro de esta propuesta metodológica, que integra distintos enfoques, resulta fundamental distinguir entre dos tipos de aproximaciones: (re)constructiva y analítica. En la primera, una vez documentada la distribución de los sitios y las rutas arqueológicas conocidas en toda el área de estudio, el siguiente paso es inferir posibles trazados o rutas que no cuentan con evidencia física directa —i.e., rutas arqueológicas o corredores de movilidad no conocidos. Estos procedimientos consisten en (re)construir estas

estructuras, proponiendo hipótesis sobre posibles itinerarios, trazados y usos, basados en factores de distinta naturaleza y modelados principalmente mediante el empleo de SIG. Por otro lado, la fase analítica tiene por objetivo abordar cuestiones más amplias que trascienden del estudio arqueológico de las rutas, aplicando enfoques de redes a los datos. Esto permite representar los datos generados como datos de red y, posteriormente, explorarlos y analizarlos. De esta manera, estas aproximaciones facilitan la producción de modelos digitales y representaciones espaciales explícitas de los fenómenos estudiados, estableciendo patrones de conectividad histórica tanto dentro como entre las regiones analizadas.

5.2.1 Coste, esfuerzo y desplazamiento

Para comprender esta propuesta metodológica, es esencial comenzar describiendo cada uno de los procedimientos y aplicaciones técnicas que se han seguido con el propósito de (re)construir las rutas o corredores históricos de movilidad y que sirvieron como base para generar las redes analizadas posteriormente. En este contexto, es importante señalar que, si bien se reconocen la multiplicidad de factores que influyen en tales procesos, parece evidente que los humanos tienden a desplazarse, en mayor o menor medida, minimizando costes (Grau Mira, 2011). Por ello, comprender los distintos modelos y tipos de desplazamiento, así como la capacidad para interpretar las representaciones que se obtienen a partir de ellos, resulta fundamental para entender las posibilidades y limitaciones analíticas de estos planteamientos de investigación (Fábrega-Álvarez, 2016: 167). De hecho, existen distintos enfoques que permiten simular estos procesos a partir de determinados factores e indicadores de movilidad, aunque todos ellos se basan principalmente en el análisis de superficie de coste acumulado o superficie de

fricción, también conocido como *Accumulated Cost Surface* (ACS). Este procedimiento, en esencia, consiste en generar a partir de un modelo digital de elevación del terreno una superficie (MDT o DEM) que represente de manera continua el área de estudio en formato ráster, donde cada celda o píxel contenga el coste o fricción de atravesarla mediante una unidad de medida o impedancia específica (Figura 5.1) (Llobera, Fábrega-Álvarez *&* Parcero-Oubiña, 2011: 3; Fábrega-Álvarez, 2016: 167).

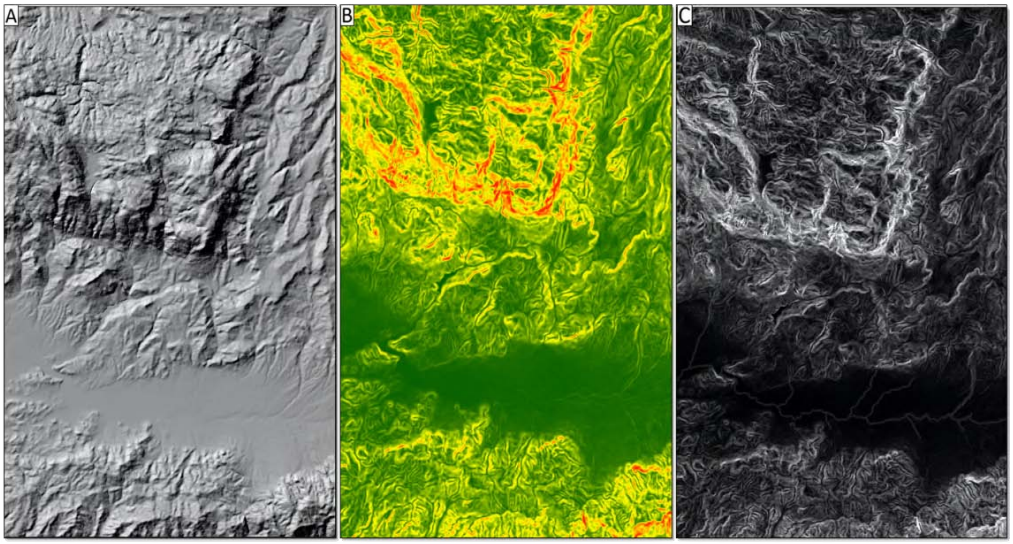


Figura 5.1. Proceso de obtención de un mapa de fricción (ACS) que represente el coste al desplazamiento a partir de un modelo digital de elevación del terreno. (A) Relieve topográfico de la llanura de Mesará (Creta); (B) Cálculo de la pendiente de la misma área, donde los colores más intensos (rojo) indican las zonas con mayor pendiente; y (C) Mapa de fricción resultante tras integrar el coste o fricción al desplazamiento de las distintas variables consideradas. Los colores más oscuros representan menor resistencia, mientras que los más claros indican mayor resistencia al desplazamiento.

Es importante destacar que, para generar estas superficies de coste o fricción, existen numerosos factores que pueden ejercer una influencia tanto facilitadora como restrictiva sobre la movilidad y que deben ser considerados dependiendo del contexto a analizar. Sin embargo, a pesar de todas estas variables, la mayoría de los estudios publicados hasta el momento se han centrado en la pendiente como el factor principal a partir del cual modelar el desplazamiento a pie en entornos terrestres. Esto se debe a dos razones

principales: la primera, es que se ha estudiado con suficiente detalle como para permitir una modelización realista de la capacidad de movimiento, incluidos los efectos del transporte; la segunda, es que es altamente probable que el uso de animales de carga o de tiro a través de estas rutas estuviera acompañado por personas a pie (Verhagen, Nuninger *&* Groenhuijzen, 2019: 220-221). No obstante, también es cierto que actualmente se dispone de información relativamente precisa sobre otros tipos y modelos de desplazamiento, como los fluviales y marítimos (Leidwanger, 2013, 2018; Safadi *&* Sturt, 2019; McLean *&* Rubio-Campillo, 2022; Gal, Saaroni *&* Cvikel, 2021a, 2021b, 2022; Trapero-Fernández *&* Aragón, 2022, Gheorghiade *&* Spencer, 2024; entre otros), así como de distintos medios de transporte (p. ej., animal, naval, sobre ruedas, etc.) (Scheidel, 2015; Carreras *&* De Soto, 2013; Whiting, 2013; Carreras, De Soto *&* Muñoz, 2019; entre otros).

Ante este panorama, y debido al contexto y los objetivos específicos de esta investigación, el enfoque principal se ha centrado en los procesos de reconstrucción de la movilidad terrestre. Esta decisión está condicionada por la necesidad de explorar las dinámicas de ocupación e interacción en entornos donde las características del paisaje y la estacionalidad de la red hidrográfica de las regiones estudiadas impiden la navegación fluvial; mientras que, para la movilidad marítima, este estudio se ha apoyado en el trabajo *Mappings of Potential Sailing Mobility in the Mediterranean during Antiquity* publicado en la revista *Journal of Archaeological Method and Theory* por el investigador David Gal y las investigadoras Deborah Cvikel (Universidad de Haifa) y Hadas Saaroni (Universidad de Tel Aviv). Estos llevaron a cabo una cartografía exhaustiva de la movilidad potencial de navegación en las cuencas oriental y central del Mediterráneo, abarcando una periodización que cubre desde el Bronce Final hasta el periodo islámico (*ca*. 1300 a.C. – 700 d.C.).

En particular, se aplican distintos métodos para medir la navegación a vela cuadrada —i.e., el uso de un tipo de vela con forma cuadrada, rectangular o trapezoidal que se cruza de manera perpendicular al mástil central del barco, muy común en embarcaciones de los periodos mencionados—, e incluyen tanto travesías directas a través de mar abierto como navegación de cabotaje —i.e., el cabotaje implica mantenerse cerca de la línea de costa, lo que permite una navegación más segura y el uso de referencias terrestres para orientarse. En este sentido, este trabajo aporta datos e información precisos para evaluar la movilidad marítima a lo largo de áreas que son de especial interés para esta investigación, proporcionando así una visión más completa del funcionamiento de los enlaces y la conectividad marítima. Además, el estudio no se limita a una descripción general de las rutas de navegación, sino que profundiza en estudios de caso específicos a diferentes escalas espaciales y contextos temporales. Por ejemplo, se incluyen los enlaces marítimos fenicios entre el Levante y las colonias occidentales, o la movilidad potencial de los envíos de grano desde Egipto a Roma. Igualmente, el estudio destaca las conexiones bidireccionales de navegación que podrían mantenerse a lo largo de la temporada estival, a pesar de los vientos etesios predominantes, entre la zona del Egeo (Creta) y la costa libio-egipcia (Marmárica) (Gal, Saaroni *&* Cvikel, 2022).

Volviendo al contexto de la modelización terrestre, es importante destacar que la creación de superficies de coste o fricción (ACS) tampoco debe limitarse únicamente a describir las características físicas del terreno, ya que existen muchas otras variables relacionadas con factores medioambientales que pueden haber influido en la capacidad de movimiento. Uno de los más representativos son las condiciones hidrológicas que, como se verá en el caso específico de Marmárica, pueden condicionar la movilidad tanto de forma

positiva como restrictiva (Vetter, Rieger & Möller, 2013; Laguna-Palma & Barruezo-Vaquero, 2023). De manera similar, en zonas de gran altitud, es posible que la presencia de nieve o hielo durante el invierno cubra los pasos o corredores naturales, por lo que la estacionalidad también podría ser una variable a considerar. Otros factores incluyen determinados tipos de terreno, como zonas inundables y pantanosas. Además, elementos como la temperatura, el viento o la vegetación, especialmente en áreas boscosas o con alta densidad vegetal, podrían reducir la capacidad de movimiento e incluso llegar a imposibilitarlo.

Por otra parte, existen toda una serie de factores de naturaleza antropogénica que también deben ser considerados, como la presencia de infraestructuras de transporte (p. ej., calzadas, puentes, puertos, etc.) y logísticas (p. ej., cisternas, *mansiones*, *mutationes*, etc.). Además, el movimiento a través del paisaje no se basaba únicamente en la búsqueda del camino más corto o eficiente, sino que también podía estar influido por normas y valores establecidos. Por ejemplo, ciertas áreas podrían haberse evitado por razones relacionadas con la seguridad, el control territorial o las creencias culturales de estas sociedades. Estos aspectos, aunque más difíciles de modelar, son esenciales y requieren de un conocimiento previo exhaustivo, ya que solo así se pueden comprender las dinámicas de movilidad y ocupación, lo que resulta fundamental para construir modelos precisos que reflejen la complejidad inherente a estos sistemas (Verhagen, Nuninger & Groenhuijzen, 2019).

Otros aspectos a considerar están relacionados con los diferentes tipos de desplazamiento según la dirección y las características del entorno, distinguiendo principalmente entre costes isotrópicos y anisotrópicos. En los primeros, se asume que las condiciones del terreno y el esfuerzo requerido

para moverse no varían según el rumbo o la dirección del desplazamiento. Esta simplificación facilita los cálculos, pero puede no ser realista en escenarios donde la topografía y las características del terreno influyen significativamente en la movilidad. Por el contrario, los segundos dependen de la dirección del movimiento. Al calcular rutas utilizando funciones de desplazamiento basadas en la pendiente, es crucial reconocer que subir una pendiente requiere de un esfuerzo distinto que al bajarla. De esta manera, los modelos anisotrópicos se ajustan a estas variaciones, haciéndolos más precisos y realistas en la estimación de las trayectorias. Este enfoque permite obtener cálculos de distancia y costes más exactos, reflejando con mayor precisión las condiciones de movilidad a través del paisaje (Connolly & Lake, 2009; Fábrega-Álvarez, 2016; Olaya, 2016).

Por lo tanto, el enfoque adoptado se centra específicamente en los costes anisotrópicos por su mayor capacidad para capturar la complejidad inherente a los procesos de movilidad. En este contexto, la literatura especializada ha proporcionado una amplia variedad de algoritmos para estimar este tipo de desplazamientos. Algunos de los más conocidos son los propuestos por Naismith (1892), Ericson y Goldstein (1980), Langmuir (1984), Tobler (*hiking function*) (1993) y/o MIDE (París Roche, 2002), entre otros. Estos métodos proponen una función exponencial que estima la velocidad, considerando la pendiente y su dirección (Márquez-Pérez, Vallejo-Villata & Álvarez-Francoso, 2017). En esta misma línea, Irmela Herzog (2013) ofrece una visión general de las diferentes funciones de coste que se han utilizado en el ámbito arqueológico. Ante tal variedad de aplicaciones, en este estudio se destaca especialmente la regla de Naismith, una función empírica que se ha aplicado en numerosos estudios de caso e incluso actualmente se encuentra integrada directamente en GRASS GIS como parte del procedimiento *r.walk* (Awaida,

Westervelt & de Mouveaux, 2015). Esta función proporciona una estimación de la duración del viaje al proponer que el coste de desplazamiento a pie (en términos de tiempo y esfuerzo) es de 1 hora para recorrer aproximadamente 5 km en terreno llano, añadiendo 1 hora adicional por cada 600 metros de ascenso en la pendiente (Naismith, 1892).

Esta elección sobre una fórmula de desplazamiento humano no es arbitraria. Como se mencionó anteriormente, es muy probable que el uso de cargas o animales de tiro a través de estas rutas estuviera acompañado por personas a pie, lo que enfatiza la importancia de considerar la movilidad humana como un elemento central de estos análisis (Verhagen, Nuninger & Groenhuijzen, 2019: 220). Esto tiene una doble implicación: en primer lugar, reconoce que los humanos no son sujetos pasivos con respecto al entorno; sino que, a través de sus dinámicas de movilidad (los caminos que eligen, las rutas que utilizan, etc.), contribuyen activamente a moldear y transformar el paisaje. En segundo lugar, subraya que el estudio de estos patrones (cómo y por dónde se desplazan las personas) permite obtener información valiosa sobre las conexiones entre diferentes lugares, lo que facilita una mejor comprensión de la estructura social, económica, política y cultural de las comunidades que habitaron estas regiones.

A partir de la consideración de cada uno de los factores y variables que ejercen un impacto sobre la movilidad, dependiendo del contexto de análisis y teniendo en cuenta una localización o localizaciones como puntos de referencia, es posible aplicar modelos específicos que simulen trayectorias y rutas históricas. Uno de los más empleados y que aparece en numerosos estudios arqueológicos es el denominado cálculo de rutas de menor coste, o análisis de ruta óptima, mayormente conocido como *Least Cost Path* (LCP, en

adelante) (Fábrega-Álvarez *&* Parcero-Oubiña, 2007; Verhagen *&* Jeneson, 2012; Güimil-Fariña *&* Parcero-Oubiña, 2015; Alberti, 2019; Manière, Crépy *&* Redon, 2020; Antoniadis, 2024; entre otros). Los LCP se basan en superficies de coste acumulado (ACS) para calcular la ruta óptima, es decir, el camino de menor esfuerzo o recursos necesarios para desplazarse entre dos puntos específicos (origen y destino) (Herzog, 2013, 2014, 2020, 2021). Así, esta aproximación permite identificar y representar el camino o ruta óptima en términos de coste de desplazamiento entre dos puntos. Este enfoque resulta particularmente útil tanto para conectar localizaciones conocidas como cuando se trabaja a una escala de análisis específica. Además, entre sus ventajas se encuentra su facilidad de aplicación e interpretación, siendo un método ampliamente reconocido y con una larga tradición de uso en la investigación arqueológica. No obstante, a pesar de sus ventajas, los LCP también enfrentan ciertas limitaciones. Una de las más significativas es su dependencia a ubicaciones conocidas (sitios arqueológicos). Esta dependencia, junto con la naturaleza fragmentaria y desigual del registro arqueológico, puede introducir un sesgo en la muestra, afectando la validez y precisión de los modelos generados. En otras palabras, si los sitios arqueológicos conocidos están concentrados en áreas específicas, el modelo tenderá a reflejar una mayor densidad de rutas en esas zonas, mientras que otras áreas, menos documentadas, podrían quedar ignoradas.

Posteriormente, este enfoque fue ampliado mediante la creación de múltiples LCP a partir de puntos simulados (sin que necesariamente representen sitios arqueológicos), y distribuidos uniformemente por toda el área de análisis, donde cada uno de estos puntos actúa tanto de origen como de destino. Este método fue desarrollado de forma independiente por Devin A. White y Sarah B. Barber (2012), quienes lo denominaron "*From Everywhere To Everywhere*" o

también conocido como análisis FETE. Más adelante, Philip Verhagen (2013) continuó trabajando y desarrollando esta idea, a la que llamó "*cumulative cost path*" o modelización CCP. En definitiva, estas aproximaciones permiten simular una red de rutas en un área determinada al calcular los caminos más eficientes entre múltiples puntos, lo que resulta en una red compleja de rutas potenciales que ofrece una representación detallada de las posibles conexiones entre distintos lugares a través del paisaje (p. ej., White & White, 2012; Murrieta-Flores, 2012; Rodríguez-Corral & Rodríguez-Rellán, 2023).

Por su parte, Marcos Llobera, Pastor Fábrega y César Parcero (2011) presentaron un enfoque alternativo para la modelización de rutas potenciales, basado en el uso de algoritmos de coste-distancia y análisis de acumulación de flujo a partir de superficies de coste acumulado (ACS). Este método permite crear lo que ellos denominan "red de movilidad focal" (*Focal Mobility Network*), proporcionando una perspectiva distinta para abordar cuestiones como: ¿cuáles son las rutas o corredores más probables para llegar a un destino específico desde cualquier zona del área de estudio? ¿cómo se puede definir y comparar la accesibilidad entre diferentes lugares? o ¿de qué manera el desplazamiento hacia ciertas zonas genera orden o estructura en el paisaje? Como se explorará a continuación, este enfoque permite (re)construir corredores naturales en un espacio continuo, sin estar condicionados por la ubicación de sitios arqueológicos adscritos a un determinado periodo (enfoque diacrónico), e identificando las conexiones más probables entre diferentes zonas geográficas en función de los costes de desplazamiento acumulados. Al hacerlo, se pueden establecer modelos que definen la accesibilidad relativa de distintas áreas dentro de un paisaje y comprender cómo los desplazamientos humanos generaron una organización y estructura únicas que transformaron la configuración del entorno.

5.2.2 Focal Mobility Network (FMN)

Cuando se definían las características de los LCP, se destacó que su funcionamiento consistía esencialmente en representar la ruta óptima, considerando los costes de desplazamiento desde un punto de origen hasta un punto de destino. Ahora, imaginemos un escenario en el que contamos con una superficie de coste o fricción (ACS) en la que no existe un punto de origen, sino únicamente puntos de destino que actúan como una especie de "sumideros". Si se derramara agua desde cualquier lugar de la superficie, esta se desplazaría a través de los corredores que presenten menor resistencia hasta llegar finalmente a estos puntos de destino, los cuales "capturarían" ese flujo. De esta forma, el proceso "dibujaría" una red que mostraría cómo se distribuyen los caminos a través del paisaje, revelando las áreas de mayor accesibilidad y los corredores preferenciales de desplazamiento hacia ciertos puntos, sin especificar un origen determinado —i.e., todas aquellas celdas (píxeles) que hay que atravesar para llegar al destino. Esta es una primera aproximación para entender conceptualmente el proceso de generación de rutas mediante redes de movilidad focal, también denominado como *Focal Mobility Network* o *Cumulative Focal Mobility Network* (FMN, en adelante) (Llobera, Fábrega-Álvarez, *&* Parcero-Oubiña, 2011; Déderix, 2016; Stančo *&* Pažout, 2020; entre otros).

Cabe destacar que este método también se puede encontrar publicado en varios trabajos bajo el nombre de Modelo de Acumulación de Desplazamiento Óptimo (MADO) (Fábrega-Álvarez, 2006, 2016; Aceituno *&* Uriarte, 2019; Moreno-Navarro, 2022; Catalán-González, Aragón Núñez *&* Trapero-Fernández, 2023; entre otros). Esto se debe a que fue desarrollado y publicado por primera vez en 2006 por Fábrega-Álvarez bajo esta nomenclatura, con el

propósito de abordar la localización de sitios arqueológicos conocidos en relación con rutas óptimas de desplazamiento, definiéndolo como un método para describir rutas sin un destino específico (Fábrega-Álvarez, 2006). Unos años más tarde este procedimiento fue reconceptualizado en la publicación *Order in Movement: A GIS Approach to Accessibility* (Llobera, Fábrega-Álvarez *&* Parcero-Oubiña, 2011), donde los autores lo redefinieron como un medio para abordar el movimiento hacia un destino sin un origen predefinido, ofreciendo nuevas posibilidades para explorar la accesibilidad de determinadas áreas.

A partir de ese momento, este método ha sido ampliamente utilizado, arrojando resultados satisfactorios para numerosos estudios de caso en diferentes contextos temporales y espaciales (Déderix, 2016; Pažout, 2017; Stančo *&* Pažout, 2020; Laguna-Palma *&* Barruezo-Vaquero, 2023; entre otros). Esto se debe a que, mediante la aplicación secuencial de una combinación sencilla e intuitiva de herramientas de coste-distancia y análisis hidrológico en un entorno SIG, se pueden identificar los corredores naturales que canalizan el movimiento y la dirección que un individuo tendería a tomar en función de su potencial movilidad para llegar a un lugar de interés desde cualquier punto del paisaje (Llobera, Fábrega-Álvarez *&* Parcero-Oubiña, 2011; Déderix, 2016). En este contexto, una de las principales ventajas de esta aproximación es su capacidad para superar la limitación de no contar con una imagen completa y detallada de las ubicaciones de los sitios arqueológicos en una región determinada. Además, como se detallará más adelante, este método proporciona valores de acumulación que resultan fundamentales para aplicar enfoques basados en redes a los datos y abordar las preguntas de investigación planteadas.

Para entender mejor todo este proceso de (re)construcción de redes, es fundamental profundizar en su funcionamiento y en los elementos necesarios para su aplicación. En este sentido, tras identificar los factores y variables que condicionan la movilidad, el siguiente paso consiste en establecer mecanismos precisos para cuantificar el papel que cada uno de ellos pudo haber ejercido. Para ello, es crucial determinar tanto la influencia de estos factores como la proporcionalidad entre ellos en relación con el área a analizar, ya que el objetivo es generar un mapa de fricción que integre y represente todas estas variables en términos de superficie de coste de desplazamiento (Figura 5.2).

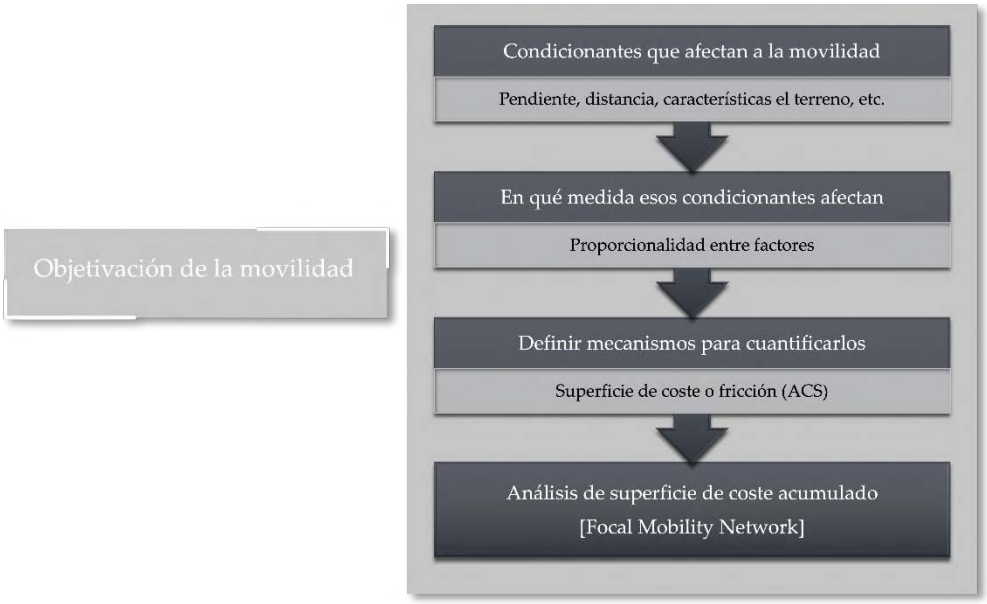


Figura 5.2. El término "objetivación" se refiere al proceso de convertir algo en objeto de análisis o estudio. En este contexto, se describen las distintas etapas o fases necesarias para establecer las bases sobre las que reconstruir las rutas o corredores de movilidad.

Posteriormente, para calcular el mapa de fricción final, es necesario establecer una función de desplazamiento que transforme los valores integrados. En este caso, se empleó la regla de Naismith (Naismith, 1892), según la cual se calculan 12 minutos por cada kilómetro recorrido en llano, más 10 minutos adicionales por cada 100 metros de desnivel (Liceras-Garrido *&* Jimeno-

Martínez, 2016; Moreno-Navarro, 2022; Laguna-Palma & Barruezo-Vaquero, 2023).

Tras obtener el mapa de fricción o superficie de coste final (ACS), es necesario generar una malla o *grid* de puntos simulados, que representan los puntos de destino. Estos puntos pueden producirse de manera aleatoria o, como en este caso, mediante la creación de una capa ortogonal de puntos distribuidos uniformemente cubriendo la totalidad del área de estudio. Con la malla creada, esta se superpone al mapa de fricción resultante, en el que se han asignado los valores de coste correspondientes a cada variable. Una vez integrados los puntos y el mapa de fricción, se procede a ejecutar de manera secuencial los pasos descritos a continuación:

(i) (A) El primero consiste en calcular la distancia desde cada punto a cada celda en relación con la capa de fricción generada previamente (*Cost distance*). (ii) (B) El segundo implica el cálculo de la dirección de flujo del coste para cada celda (*Flow direction*), con el fin de determinar la dirección de desplazamiento. Es decir, a partir del ACS, se pueden determinar las direcciones de flujo de cada celda, de manera que los valores más altos de coste se orienten hacia los más bajos. (iii) (C) El tercer paso es el cálculo del coste acumulado (*Flow accumulation*), en función del mapa de direcciones generado en el paso anterior. Para ello, se aplica un algoritmo para calcular las zonas de acumulación de flujo, similar a lo que ocurre en los modelos hidrológicos. Este análisis permite determinar las áreas donde se acumula mayor movilidad potencial (donde más flujos convergen), y, por lo tanto, identificar posibles rutas o corredores de movilidad. Así, el coste acumulado refleja el esfuerzo total necesario para desplazarse a través del terreno, lo que

proporciona información clave para interpretar las dinámicas de movilidad en relación con el entorno (Figura 5.3).

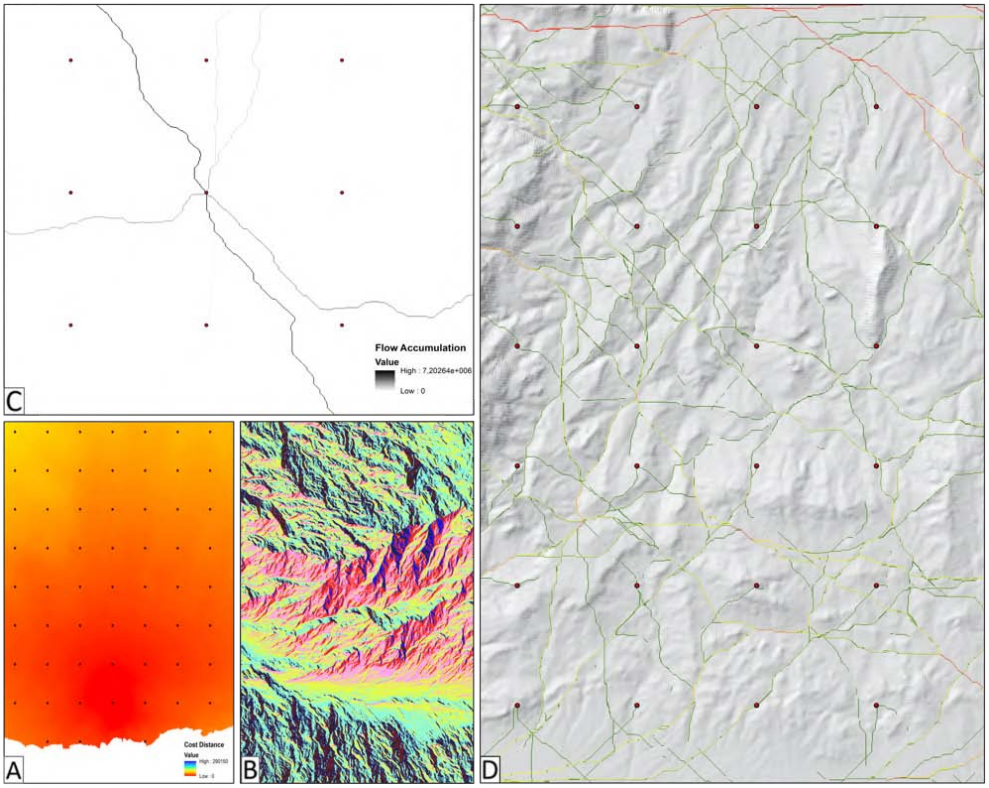


Figura 5.3. Ejemplos de resultados tras aplicar la secuencia de operaciones del FMN. (A) análisis de coste-distancia (*Cost Distance*); (B) dirección de flujo (*Flow Direction*); (C) acumulación de flujo (*Flow Accumulation*); y, finalmente, (D) se muestran los resultados finales, con las rutas o corredores de movilidad generados a partir del FMN, que conectan con los puntos de destino siguiendo los corredores que representan menor resistencia al desplazamiento.

Todo este proceso o secuencia de operaciones debe realizarse para cada punto que representa un destino. Para agilizar y optimizar este procedimiento, se incorpora una herramienta iteradora que permite automatizar la secuencia de operaciones en un entorno SIG. Esta herramienta ejecuta de manera automática, para cada uno de los puntos, la secuencia de cálculos descrita en el párrafo anterior. Esto puede realizarse tanto a través de la implementación de un algoritmo mediante código como configurando el flujo de trabajo en una herramienta como —por ejemplo— *Modelbuilder* en ArcGIS (Figura 5.4).

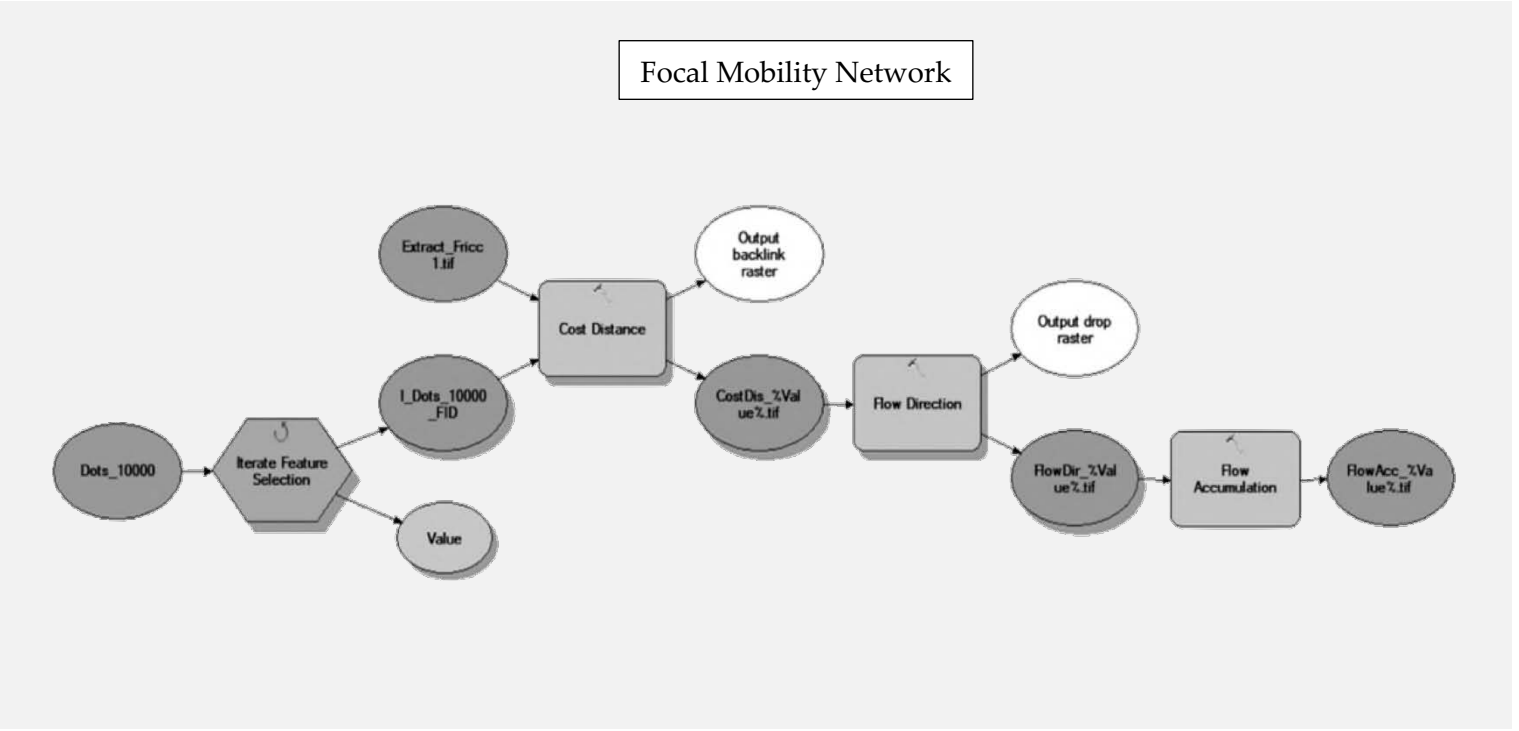


Figura 5.4. Secuencia de operaciones del FMN automatizada en la herramienta *ModelBuilder* en ArcGIS (v.10.5).

Como resultado, se obtiene una capa ráster por cada punto, en la que cada celda contiene un valor que representa el coste acumulado de desplazamiento desde cualquier lugar del área de estudio hacia el punto destino. Finalmente, se calcula la media o la suma de todas las capas para obtener una capa final en la que los valores de acumulación de desplazamiento están integrados. De este modo, se obtiene un valor de flujo para cada una de las celdas que conforman los ráster que representan los paisajes analizados. No obstante, la calidad de los resultados obtenidos dependerá en gran medida del número de puntos establecido y de la resolución del modelo digital de elevación del terreno utilizado. Todos estos parámetros deben ajustarse a la realidad de estas regiones, así como a la calidad y disponibilidad de los datos y, sobre todo, a las necesidades y preguntas de investigación. Lo relevante de este método radica en que, al no requerir un origen conocido y emplear todas las celdas (píxeles) del área de estudio, siempre se dispone de un valor de acumulación que puede interpretarse en relación con el conjunto de valores obtenidos en el análisis.

De este modo, se genera una capa ráster que debe reclasificarse para visualizar de forma gradual distintas configuraciones de rutas o corredores con los valores más elevados —i.e., aquellos con mayor potencial movilidad. Además, siempre que se puedan reconstruir las características del paisaje, estas rutas tendrán un carácter diacrónico, ya que no dependen de sitios arqueológicos adscritos a un periodo específico. En lugar de ello, representan cómo se configura y estructura la movilidad en un paisaje determinado. Esto ha proporcionado una alta fiabilidad en cuanto a la representatividad de los paisajes y periodos analizados que, junto al trabajo previo sobre digitalización de sitios y rutas conocidas, ha permitido obtener diversos modelos independientes no tan condicionados y que pueden ser comparados.

5.2.3 Gestión de la incertidumbre en el análisis geoespacial

Tanto en el estudio derivado del análisis de acumulación de flujo, así como en otros que generan valores de intensidad, como es el caso del análisis FETE, se observa un fenómeno común: aunque todos estos modelos consideran los costes locales y globales (en base a la ACS), cuando se generan rutas entre puntos distribuidos de manera regular a lo largo del área de estudio, la concentración de rutas —i.e., la densidad de caminos generados— puede no reflejar con precisión los costes de desplazamiento. Esto implica que, incluso en áreas donde estos costes son altos (p. ej., cadenas montañosas) o muy bajos (como llanuras), el modelo puede generar un número considerable de rutas debido a la distribución regular de los puntos y la metodología de conexión utilizada, ya sea FMN, FETE o CCP. Si bien este fenómeno parece ser más pronunciado en aproximaciones que dependen de puntos de origen y destino (como FETE o CCP), todos estos métodos tienden a generar una gran cantidad de rutas debido a su enfoque en la conexión exhaustiva entre puntos en toda el área de análisis. En la práctica, esto puede plantear un problema significativo para la interpretación. Por ejemplo, Herzog (2013) señala que, aunque los modelos se basen en una ACS, no siempre ajustan la densidad de rutas a los costes reales del terreno. Esto puede llevar a interpretaciones inexactas de la movilidad, sobreestimando la posibilidad de movimiento en áreas que, en la realidad, habrían sido menos transitadas.

Otra limitación comúnmente reconocida en el ámbito del análisis geoespacial, y que también está presente al aplicar este tipo de aproximaciones, es el fenómeno denominado como "efecto borde" (*edge effect*) (Griffith & Amrheim, 1983; Borgatti, Carley & Krackhardt, 2006; Park, 2009; Sadler, Gilliland &

Arku, 2011; Gil, 2017; entre otros). En este caso, al obtener el ráster final con los valores de acumulación de flujo, tras calcular los ráster que representan la acumulación individual para cada punto, se observa que las celdas (píxeles) más cercanas a los bordes del área de estudio presentan valores notablemente inferiores en comparación con las ubicadas hacia el interior (especialmente en el estudio de caso de Marmárica). Este fenómeno ocurre porque, independientemente de la morfología de la capa de fricción utilizada, los píxeles de las zonas del interior del área de estudio tienen una mayor intermediación. Es decir, estas celdas son mucho más utilizadas para desplazarse hacia cualquier punto de la superficie en comparación con las que están situadas hacia los límites del área de estudio.

Para abordar esta problemática, de manera tradicional se han utilizado diferentes aproximaciones que intentan superar estas limitaciones. Una de las más comunes y efectiva es realizar el análisis sobre una capa de fricción considerablemente más amplia que el área de interés. Sin embargo, esto solo puede realizarse donde sea posible ampliar la región analizable, es decir, en zonas que no estén limitadas por la costa, como ocurre en una isla, o en áreas que no sean lo suficientemente grandes como para que el coste computacional haga inviable el análisis. Otra opción es incrementar el número de puntos a lo largo de la periferia del área de estudio, es decir, incluir un mayor número de puntos a lo largo de las líneas que representan los límites de la zona a analizar. No obstante, en el caso del FMN, debido a la naturaleza y funcionamiento de los análisis de acumulación de flujo, esto no suele ofrecer resultados muy satisfactorios en cuanto a la distribución en los valores de acumulación.

En consecuencia, conocer el grado de distorsión provocado por estos fenómenos es fundamental, a pesar de que este dependa de numerosos

factores, entre los que se encuentran el tamaño del área de estudio, el número y distribución de los puntos utilizados, así como las propias variables empleadas para crear la superficie de coste o fricción (ACS). Entonces, ¿cómo se pueden abordar estas limitaciones? Para mejorar la precisión de los modelos, se podrían implementar los siguientes ajustes adicionales: (i) establecer umbrales de coste para excluir automáticamente áreas por encima de ciertos valores; (ii) ponderar las rutas asignando un peso o probabilidad de uso en función de los costes implicados, reduciendo así la importancia de los caminos localizados en zonas de muy alto o bajo coste; y (iii) incorporar datos adicionales como información etnográfica, histórica o geográfica, para mejorar la interpretación de la movilidad durante los periodos analizados.

Para afrontar este desafío, se presenta un algoritmo matemático desarrollado *ex novo* en coautoría con el investigador Fernando Moreno-Navarro (*Università Roma Tre*) durante el transcurso de esta investigación, que actualmente se encuentra en proceso de publicación y que también se detalla en la tesis doctoral *Paisajes, territorio y economías domésticas en el norte de la Carpetania romana: una aproximación desde la ciencia de redes* (Moreno-Navarro, 2023). En este caso, se decidió prescindir del carácter progresivo de los datos de acumulación de flujo y se empleó una reclasificación de carácter estadístico, diseñada para clasificar los rangos de acumulación en función de la frecuencia de dichos valores.

Como se ha mencionado anteriormente, la obtención de una red mediante FMN requiere de un proceso de reclasificación de los valores de acumulación obtenidos. Esto implica establecer umbrales que permitan visualizar las rutas más significativas en función de la escala y los objetivos específicos de la investigación —por ejemplo— identificando y jerarquizando entre posibles

rutas principales y secundarias. Por lo tanto, es necesario ajustar los valores obtenidos en el modelo para evitar una representación excesivamente compleja o, por el contrario, demasiado simplificada de estas estructuras de movilidad.

En este contexto, es fundamental tener en consideración que los valores de acumulación varían a lo largo de la región, lo que significa que diferentes áreas presentan distintas densidades de rutas. Comprender esta distorsión es crucial para crear un modelo más preciso y realista de estas estructuras. Así, si la distorsión de los valores de acumulación sigue un patrón continuo, el gradiente de la función podría expresarse matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$\nabla f(x)= x \tag{1}$$

En este caso, la función $f(x) = x$ describe una relación lineal en la que la acumulación de flujo varía proporcionalmente a la distancia desde el borde del área de estudio, representada por x. A medida que el valor de x aumenta, el valor de la acumulación de flujo también crece linealmente, reflejando el cambio gradual conforme nos alejamos de los límites del área de estudio. Esto muestra cómo la densidad de rutas puede variar en función del espacio geográfico, lo que significa que las áreas con mayor valor de x tendrán una mayor acumulación de flujo. De hecho, a medida que nos alejamos de los límites, los valores de acumulación aumentan de manera continua, lo que refleja una mayor representatividad (densidad) de rutas a medida que nos acercamos hacia el interior del área de estudio. En consecuencia, para poder manejar esta distorsión, se debe conocer la distribución de los valores de acumulación de manera detallada para toda el área a examinar.

Para ello, en primer lugar, es necesario seleccionar un umbral para las celdas (píxeles) más cercanas a los bordes del área de estudio, ajustando estos valores de acumulación para reflejar adecuadamente la densidad de las rutas en estas zonas. A continuación, es necesario realizar el mismo procedimiento para determinar un segundo umbral para las celdas más alejadas de los límites, es decir, las cercanas al interior, permitiendo que el modelo refleje las variaciones en la acumulación de flujo a lo largo de toda al área de estudio. Estos umbrales deben determinarse en función de la distribución de los valores de acumulación observados, asegurándose de que sean representativos de las principales rutas de movilidad que estructuran el paisaje de las regiones analizadas. Finalmente, también es imprescindible determinar la distancia máxima desde los límites del área de estudio hasta la zona más interna. Para ello, se genera una capa ráster que representa la distancia euclidiana desde los límites hacia el interior. Una vez que se dispone de esta información, es posible aplicar la siguiente ecuación basada en la anterior función:

$$y=x+c \tag{2}$$

Donde:

- y es el valor de acumulación de flujo a partir del cual se genera la red en el interior del área de estudio.
- x es el valor de la distancia, en este caso, calculada a partir de la distancia euclidiana.
- c representa el valor de acumulación de flujo a partir del cual se genera la red en las celdas más cercanas a los límites del área de estudio, es decir, el valor mínimo.

Mediante la aplicación de esta sencilla fórmula, se obtiene una capa ráster que permitirá descartar gradualmente aquellos valores que estén por debajo de los valores establecidos. Además, es posible normalizar estos valores dividiéndolos por un gradiente de 0 a 1, generado a partir de la capa de distancia euclidiana. Esta normalización facilita la comparación de valores de acumulación en toda el área analizada, asegurando que los datos sean consistentes y representativos en todas las zonas que la constituyen. En términos aplicados, se puede utilizar la siguiente fórmula en la herramienta de la calculadora ráster de los principales software SIG:

SetNull ("Flow_Acc" < "R", "Flow_Acc" / "N")

Donde:

- "*Flow_Acc*" representa la capa de acumulación de flujo en formato ráster.
- "*R*" representa la capa generada mediante la fórmula (2), que proporciona la información para descartar valores de acumulación de flujo.
- "*N*" representa el valor calculado para normalizar los valores de acumulación, que debe ser un gradiente de 0 a 1.

Al aplicar estos parámetros, como resultado se obtiene una capa en formato ráster que sólo muestra los valores por encima de las acumulaciones de flujo establecidos y, a su vez, estos valores se han normalizado para que sean comparables en toda el área de estudio. Este último valor "*N*" también puede utilizarse para dividir la capa de acumulación de flujo y generar así una capa ráster de valores de acumulación relativos sin descartar ningún valor. Esta

capa de acumulación relativa permite obtener datos comparables que pueden utilizarse en el análisis de redes, donde los valores se interpretan como una medida de la fortaleza (intensidad) de las conexiones en la red. Al integrar estos datos en modelos de redes espaciales, es posible identificar los corredores de movilidad más significativos y realizar análisis más detallados sobre la conectividad en estas regiones.

Por otro lado, también es posible considerar que la distorsión generada tras aplicar el análisis mediante FMN no sea similar a un gradiente continuo, como se ha visto en el caso anterior, sino que sea un gradiente pseudo parabólico o irracional, que se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\nabla f(x) = \sqrt{x} \tag{3}$$

Como se puede comprobar en la gráfica, la distorsión aumenta de manera exponencial a medida que se aproxima al borde de la región analizada (Figura 5.5).

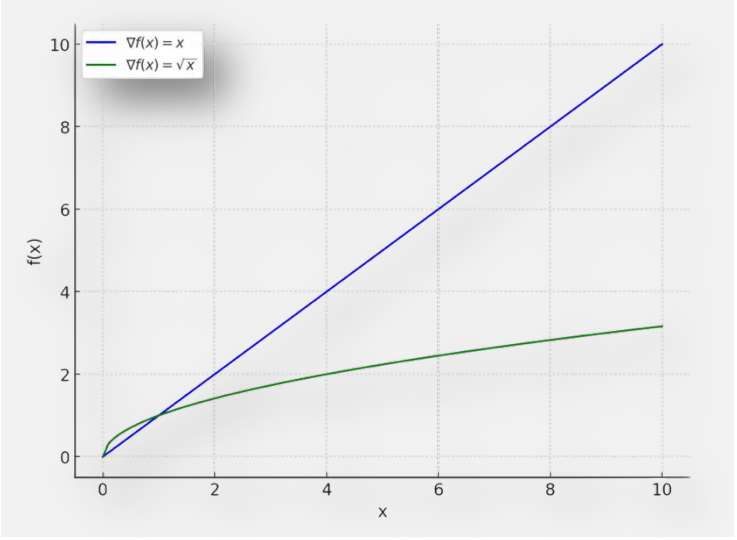


Figura 5.5. Gráfico que representa las funciones mencionadas en el texto. La función continua (1) se muestra en azul, mientras que la función pseudo parabólica (3) se representa en verde.

Para poder generar la capa ráster que permita descartar los valores de acumulación por debajo del gradiente representado por la anterior función, es necesario aplicar la siguiente ecuación:

$$y= \sqrt{(x \cdot b)+c} \quad (4)$$

Donde:

- *y* representa el valor de acumulación de flujo desde el que se genera la red en aquellas áreas más alejadas de los límites del área de estudio.
- *b* es el valor de la distancia representado por la capa de distancia euclidiana.
- *c* representa el valor de acumulación de flujo desde el que se genera la red en las áreas más cercanas a los límites del área de estudio.

Para generar la capa ráster "*R2*", es esencial despejar la *x* en la ecuación. Esto implica calcular el valor de *x* en función de la distancia euclidiana (*b*) y la constante (*c*), que ajusta el valor de acumulación en las áreas cercanas a los límites.

Adicionalmente, existe la posibilidad de generar una capa ráster "*N2*" que normaliza los resultados, utilizando una ecuación basada en el mismo gradiente de la función (3). La normalización es clave para estandarizar los valores de acumulación, permitiendo comparaciones consistentes en toda el área de estudio. Para ello, se debe calcular la raíz cuadrada del gradiente de 0 a 1 sobre la base de la distancia euclidiana, de forma similar a la utilizada anteriormente. En este caso, llamaremos a la capa "*N2*".

Una vez que se dispone de estas capas en formato ráster, se realizan los mismos cálculos que en el primer caso. Para ello, simplemente se divide la capa de acumulación por la capa "*N2*" que se ha obtenido anteriormente. Así, se consiguen resultados de acumulación de flujo relativos, es decir, una capa con valores que pueden analizarse por igual en todas las zonas que constituyen el área de estudio. Además, también se pueden implementar los siguientes parámetros mediante la herramienta de calculadora ráster:

SetNull("Flow_Acc" < "R2", "Flow_Acc" / "N2")

De este modo, la herramienta se emplea para descartar aquellos píxeles cuyos valores de acumulación se encuentren por debajo del umbral establecido para generar el modelo de red. Al mismo tiempo, los valores de acumulación de cada segmento dentro del rango de interés son normalizados. Estos procedimientos de reclasificación estadística de los valores de acumulación de flujo permiten ajustar dichos valores para que sean más comprensibles y representativos de los patrones reales de movilidad. Además, la normalización de los datos mediante gradientes facilita la comparación y una mejor integración de la información en los modelos, asegurando que los resultados y las posibles interpretaciones derivadas sean más precisas y estén mejor contextualizadas.

5.3 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE REDES & MODELIZACIÓN TEÓRICA

Resulta útil distinguir entre dos categorías principales de aplicaciones de las redes espaciales en investigación arqueológica: el análisis exploratorio de redes y la modelización teórica. En primer lugar, se considera el análisis exploratorio de redes, categoría a la que pertenece buena parte de los estudios publicados hasta el momento. En estos trabajos, se utiliza la representación y análisis de datos de red para el estudio de conjuntos de datos arqueológicos, donde la motivación parte de los propios datos y tiene un carácter fundamentalmente exploratorio (p. ej., Leidwanger, 2017). Este enfoque posibilita plantear preguntas como: ¿cómo se relacionan los nodos (p. ej., asentamientos) entre sí? ¿cómo se estructuran estas relaciones? ¿qué papel juegan las conexiones entre ellos? Este tipo de análisis requiere la selección de un aspecto específico del conjunto de datos para ser representado como nodos, y algún otro aspecto como reflejo de las relaciones documentadas entre estos nodos, —i.e., los enlaces. En esta investigación, como se ha destacado anteriormente, los nodos representan antiguos asentamientos o puntos estratégicos de conexión, mientras que los enlaces definen las relaciones, interacciones o estructuras de movilidad que los interconectan.

En este contexto, los procedimientos y herramientas expuestos en el apartado anterior ofrecen la posibilidad de identificar e interpretar rutas o corredores potenciales de movilidad. Sin embargo, como se ha mencionado, esta investigación no se limita al estudio arqueológico de las rutas, sino que también busca representar y analizar los patrones y la conectividad histórica tanto dentro como entre las regiones analizadas. Para lograr este objetivo, se han aplicado enfoques de redes a los datos, lo que permite representarlos

como datos de red y, posteriormente, analizarlos (Brughmans, 2013; Knappet, 2011; Brughmans & Peeples, 2020; 2023; Knodell, 2021; Brughmans *et al*., 2023). De este modo, al (re)construir las posibles rutas o corredores potenciales, se ha mejorado la comprensión topológica de las redes de movilidad que articulan estas regiones. Además, se han obtenido una serie de valores de acumulación que permiten medir la fortaleza de las conexiones entre diversos lugares en función de su circulación potencial. Esto resulta fundamental, ya que este estudio se basa en redes espaciales, donde la conectividad no se determina únicamente por el número de conexiones que vinculan un lugar en particular, sino también por la fortaleza (intensidad) de dichas conexiones.

No obstante, antes de aplicar estos planteamientos a los datos, es esencial llevar a cabo una serie de pasos u operaciones previas. Entre ellas, se incluye la revisión y corrección de posibles errores topológicos que podrían haber surgido durante la generación de la red, como segmentos fraccionados o intersecciones sin continuidad. Este proceso es fundamental para garantizar que la red analizada genere la menor cantidad de distorsiones posibles. Una vez revisada y corregida la red, el siguiente paso consiste en integrar los valores de acumulación (ráster) correspondientes a cada segmento o tramo de ruta (vector). Para asegurar que los datos reflejen la mayor precisión posible, se generó primero un análisis de densidad de líneas (*line density*), lo que permite identificar visualmente y de forma gradual las áreas con los mayores valores de acumulación de flujo asociados a cada tramo de ruta. Posteriormente, se creó un área de influencia (*buffer*) en formato vectorial, estableciendo parámetros de distancia lineal de 1 km a ambos lados de cada segmento, y empleando por defecto el método "*planar*" para su generación. Este procedimiento garantiza que, al trabajar con un sistema de coordenadas

proyectadas, como este caso, el resultado del *buffer* para las zonas de influencia se genera en distancia euclidiana. El objetivo de este proceso es capturar todos los valores de acumulación dentro del área de influencia de cada segmento de la red y no limitarse únicamente a los valores de los píxeles atravesados por la red vectorizada (Figura 5.6).

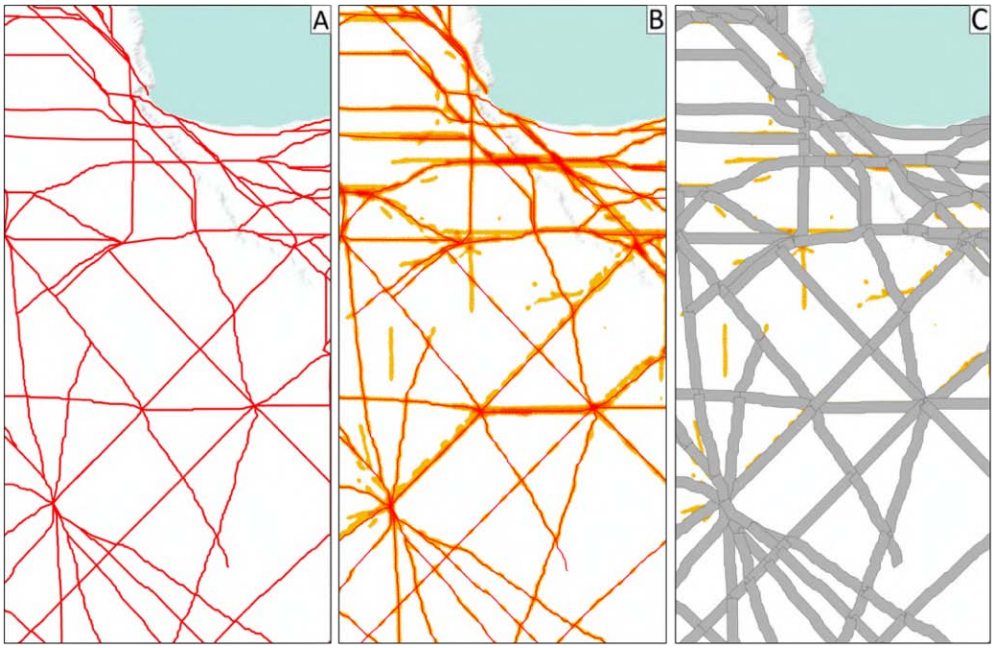


Figura 5.6. Proceso de integración de los valores de acumulación de flujo asociados a cada segmento de la red. (A) Red en formato vectorial de Marmárica; (B) análisis de densidad de líneas (*Line Density*) que muestra, mediante un mapa de calor, las celdas (píxeles) con los mayores valores de acumulación de flujo (potencial movilidad); (C) *Buffer* creado a 1 km a cada lado de cada segmento para "capturar" los valores de acumulación.

Con el fin de ampliar la capacidad analítica del estudio, también se obtuvieron diversas métricas a partir de estos valores. Estas mediciones incluyen el área, el número de celdas, la suma, la media, la desviación estándar, el rango y la longitud para cada tramo. Para calcularlas, se utilizaron herramientas de análisis estadístico integradas en el propio software SIG, lo que permitió, además, integrarlas como atributos asociados a las redes generadas.

Finalmente, para completar la estructura de los datos de la red, resultó esencial establecer nodos al inicio y al final de cada segmento, asignando un ID único a cada uno de ellos. Para realizar esta tarea y asociar los nodos con las rutas correspondientes, se crearon previamente dos nuevos campos en la tabla de atributos de la capa de rutas, denominados *endpoint 1* y *endpoint 2*, los cuales representan los extremos o puntos de intersección donde finaliza cada segmento. Tras completar estos pasos, se obtiene una capa que no solo representa la red integrada de cada región de estudio, sino que también incluye todos los datos necesarios para realizar el análisis exploratorio.

5.3.1 Medidas de centralidad

Dado que las preguntas de investigación se centran en identificar el papel desempeñado por antiguos asentamientos, puntos clave de conexión y rutas de tránsito como ejes articuladores dentro de las estructuras de comunicación e intercambio que configuran estos paisajes, uno de los objetivos principales fue analizar de manera independiente el papel ejercido tanto por los nodos (asentamientos, puntos de conexión) como por los enlaces (rutas, corredores de movilidad). Sin embargo, ¿cómo es posible determinar cuáles son los nodos y enlaces más críticos dentro de estas redes y qué rol desempeñan? Para abordar estas cuestiones, se dispone de diversas métricas que permiten evaluar el papel que desempeñan estas entidades en términos de accesibilidad y conectividad, las cuales se agrupan bajo el concepto de "centralidad". En términos generales, la centralidad puede definirse como un conjunto de medidas que facilitan la identificación de nodos y enlaces estratégicos, permitiendo comprender la estructura y el funcionamiento general de una red (Freeman, 1979; Brughmans, 2010, 2013; Knappett, 2011; Collar *et al.*, 2015; Brughmans *&* Peeples, 2023; Brughmans *et al.*, 2023).

Por lo tanto, en un primer nivel de análisis se examinó la estructura de las rutas de movilidad para lo que se empleó el paquete de aplicaciones *Spatial Design Network Analysis* (sDNA, en adelante), desarrollado por la *Cardiff School of Planning and Geography* y el *Sustainable Places Research Institute* (https://sdna.cardiff.ac.uk/sdna/). Originalmente, el sDNA fue diseñado para adaptar métricas de ciencia de redes al análisis de redes espaciales, especialmente en entornos urbanos, aunque también se ha aplicado en el contexto de redes de transporte históricas a diferentes escalas de análisis (p. ej., Orengo & Livarda, 2016). Esta herramienta permite extraer métricas clave para entender la estructura y el funcionamiento del conjunto de una red en función de parámetros como la centralidad de los segmentos que la componen (Cooper, 2015; Cooper & Chiaradia, 2015, 2020).

Mediante este tipo de aproximaciones, ha sido posible evaluar qué tramos eran más centrales y estaban mejor conectados, y cuáles desempeñaban un papel crucial en el flujo de comunicación e intercambio dentro de estas redes. En particular, las métricas analizadas, —sobre las que se profundiza en los siguientes apartados—, son el grado de centralidad (*degree centrality*), el grado de cercanía (*closeness centrality*) y el grado de intermediación (*betweenness centrality*). En este primer nivel de análisis, la primera métrica refleja el nivel de conectividad inmediata de un enlace (ruta), determinado por el número y la fortaleza (intensidad) de su circulación potencial; la segunda indica cuán cerca está un enlace de todos los demás, mientras que la tercera mide cuántas veces un enlace actúa como un "puente" o intermediario entre diferentes partes de la red.

Posteriormente, en un segundo nivel de análisis, se continuó profundizando en la exploración de estas redes para examinar los patrones y la estructura de las relaciones entre nodos y sus conexiones. Para ello, el siguiente paso consistió en exportar los datos a un software específico de visualización y análisis de redes, lo que permitió representar los datos como datos de red. En este caso, se utilizó Visone (v.2.24.1), un software libre que permite la creación de representaciones gráficas de redes, facilitando la exploración de su estructura, los elementos básicos y el análisis de las interacciones entre sus componentes fundamentales. Este tipo de software también incorpora herramientas que permiten la aplicación de técnicas analíticas avanzadas, como la detección de subgrupos, la evaluación de la centralidad y el análisis del grado de conectividad dentro de la red. Además, ofrece configuraciones visuales que posibilitan reorganizar nodos y enlaces, liberándolos de sus restricciones geográficas. Este enfoque resulta crucial para visualizar con mayor claridad la fortaleza de las conexiones y para identificar relaciones subyacentes entre las entidades que podrían pasar desapercibidas bajo una representación espacial tradicional.

Esta versatilidad proporcionó una mayor profundidad en el estudio de las redes, permitiendo captar tanto las dinámicas internas como las conexiones más significativas. De este modo, se analizaron métricas clave como la intermediación, que mide cuántas veces un nodo o enlace actúa como intermediario entre otros, indicando su importancia estratégica en la red; la cercanía, que evalúa qué tan rápido se puede acceder desde un nodo o enlace a los demás, indicando su eficiencia en términos de accesibilidad; y el grado de conectividad, que refleja el nivel de integración de estos elementos en el sistema.

A modo de ejemplo, es posible explorar el papel de los nodos en función de su posición y sus relaciones con otros dentro de la estructura de la red (Figura 5.7).

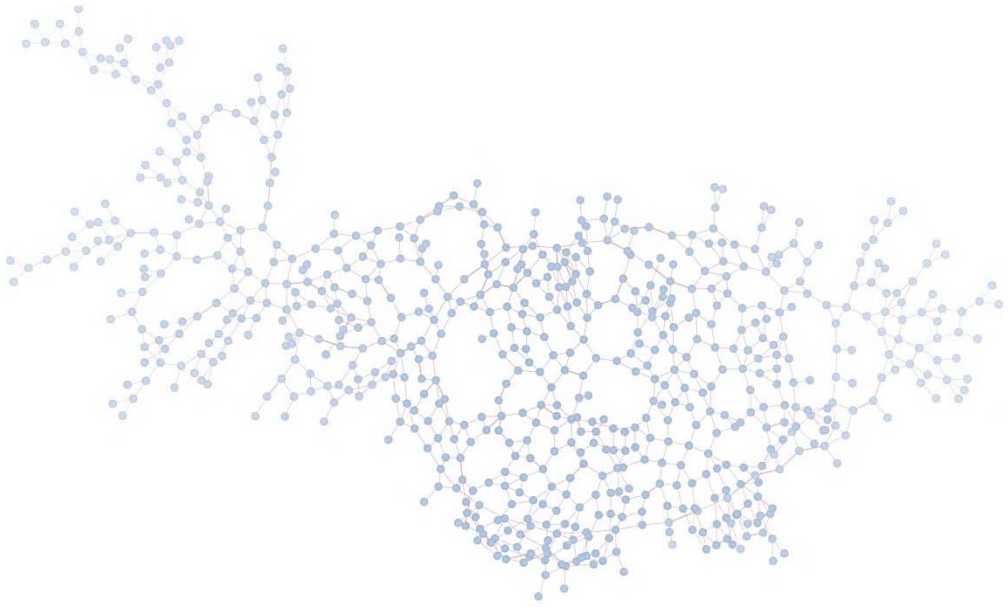


Figura 5.7. Representación de la red de movilidad de la isla de Creta. Los nodos han sido liberados de su posición geográfica original para visualizar la red en función del número de nodos y enlaces (conexiones) entre ellos.

En este contexto, es importante destacar que la mayoría de las medidas de centralidad pueden arrojar diferentes resultados y clasificaciones, ya que cada una representa determinados atributos del concepto de "centralidad". Esto ocurre porque cada métrica pone énfasis en un aspecto específico de las relaciones entre entidades, como el número de conexiones directas, la proximidad, la intensidad o la capacidad para actuar como intermediario dentro del flujo de comunicación e intercambio. Por esta razón, al utilizar el término "medidas de centralidad", es fundamental definir previamente qué se quiere determinar, a fin de seleccionar el método más adecuado en función de las preguntas y el contexto de investigación.

Siguiendo esta línea de argumentación, se pueden establecer algunos supuestos útiles a la hora de elegir el enfoque más apropiado: (i) Si el objetivo es explorar cómo ciertas entidades están conectadas con muchas otras, se aplicará un enfoque que evalúe el número de conexiones directas o la intensidad de dichas conexiones, como el grado de centralidad. (ii) Si tanto los nodos como los enlaces son relevantes en función de su proximidad, lo que resulta crucial en contextos donde las relaciones espaciales desempeñan un papel fundamental, se empleará un enfoque basado en el grado de cercanía. (iii) Si los nodos o enlaces de la red son esenciales para el flujo de comunicación e intercambio, se utilizarán medidas que evalúen cómo estas entidades actúan como intermediarios o puntos de conexión clave, como el grado de intermediación (Brughmans & Peeples, 2023: 133-135).

Grado de centralidad (Degree centrality)

A pesar de estos tres supuestos y los matices que conllevan, la definición tradicional de centralidad se ha basado generalmente en medir la cantidad de conexiones directas (enlaces) que una entidad (nodo) tiene dentro de una red. Este planteamiento, asume que cuantos más enlaces directos tiene un nodo, mayor es su centralidad o importancia dentro de la red. Esta medida es útil en contextos donde la cantidad de conexiones refleja directamente la capacidad de un nodo para interactuar con otros, tal y como se expone en numerosos estudios de caso (p. ej., Dicks, 1972; Isaksen, 2008, entre otros). Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones cuando no solo se evalúa el número de conexiones, sino también la intensidad o circulación potencial entre ellas. Un claro ejemplo es este estudio, donde la conectividad no se determina únicamente por el número de conexiones que conectan distintos lugares, sino por la fortaleza (intensidad) de dichas conexiones. Esto tiene

implicaciones vinculadas a variables como la frecuencia de uso, la cantidad de recursos o la accesibilidad de determinadas áreas, lo que añade una dimensión adicional al análisis.

En el caso específico de las redes espaciales, las conexiones entre asentamientos, o puntos estratégicos deben medirse en función de su capacidad para facilitar la circulación de personas, bienes e información. Por lo tanto, un nodo con pocas conexiones, pero con enlaces de gran intensidad (valores altos de acumulación de flujo), puede representar una mayor conectividad que un nodo con muchas conexiones, pero de baja intensidad. Este enfoque refleja un cambio en la forma de definir la conectividad, donde evaluar la fortaleza de las conexiones puede revelar información clave sobre la organización social, la estructuración de las rutas de transporte y las interacciones entre comunidades. No obstante, existen dos medidas adicionales clave, que ya se han mencionado anteriormente de manera introductoria, y que proporcionan información adicional sobre el papel que desempeñan determinadas entidades: el grado de cercanía e intermediación.

Grado de cercanía (Closeness centrality)

El grado de cercanía es una métrica utilizada para cuantificar cómo de cerca está una entidad, —i.e., un nodo (p. ej., un asentamiento) o un enlace (p. ej., una ruta)— de todas las demás dentro de una red. Específicamente, refleja la distancia media de estos elementos al resto, lo que permite identificar cuáles están mejor conectados y pueden funcionar como puntos estratégicos para la comunicación e intercambio efectivo en términos de proximidad. Esta capacidad de facilitar interacciones rápidas y eficientes las convierte en elementos clave. En el caso específico de las redes espaciales, los nodos o

enlaces con un alto grado de cercanía pueden representar centros o rutas que desempeñan un papel fundamental en los patrones de movilidad en una determinada región, actuando como puntos estratégicos de conexión entre distintas áreas (Freeman, 1979; Brughmans, 2013; Brughmans *et al.*, 2023). Esto es fundamental para comprender cómo se configuran y estructuran las dinámicas y procesos de interacción, tanto dentro de determinadas regiones como en sus conexiones hacia el exterior.

Grado de intermediación (Betweenness centrality)

Por su parte, el grado de intermediación revela la importancia de una entidad (nodo o enlace), no en términos de su proximidad a los demás, sino de cuántas veces actúa como intermediario entre ellos. Es decir, mide la cantidad de ocasiones en las que un nodo o enlace actúa como conexión entre aquellos que no están directamente conectados entre sí. En lugar de evaluar la cercanía, esta métrica se enfoca en el rol que desempeñan estos elementos para facilitar el flujo de información, bienes o personas dentro de una red más amplia. Por lo tanto, al calcular esta medida, es posible evaluar la relevancia de estos elementos en función de su posición estratégica, determinando cuántas veces actúan como intermediarios (Freeman, 1979; Brughmans, 2013; Brughmans *et al.*, 2023). Este aspecto es crucial, ya que, al aplicar esta métrica a redes espaciales, se pueden identificar puntos o rutas clave que facilitan una mayor interacción. Esto implica que, si se elimina un nodo (un asentamiento) o un enlace (una ruta) con alta intermediación, las conexiones pueden verse interrumpidas o alteradas, lo que destaca su importancia para el funcionamiento global de la red.

5.3.2 Modelos de redes espaciales

Como se destacó anteriormente, existen dos categorías principales de aplicaciones de redes espaciales en arqueología: el análisis exploratorio de redes y la modelización teórica. Tras haber examinado la primera, se aborda ahora la segunda. Esta última representa un número menor de trabajos, aunque en crecimiento, que se centran en el uso de datos de red para representar una teoría relacional, explorando cómo esta se desarrolla a lo largo del tiempo y analizando sus implicaciones (p. ej., Knappett, Evans *&* Rivers, 2008, 2011). En estos estudios, la motivación no surge de los datos, sino de la teoría: ¿cuál es la hipótesis arqueológica sobre un fenómeno relacional del pasado?, ¿qué estructura de red representa de manera más adecuada esta hipótesis? y ¿qué procesos ocurren dentro de dicha estructura, es decir, cómo fluyen los bienes, las personas o las ideas a través de ella?

Un caso ilustrativo es el estudio que realizaron Carl Knappett, Tim Evans y Ray Rivers (2008, 2011) sobre la conectividad entre comunidades insulares durante el Bronce Medio en el Egeo. En su modelo de red ARIADNE, llevaron a cabo una representación formal de una de estas teorías, en la que los nodos representaban comunidades insulares con una ubicación espacial específica, y las conexiones (enlaces) relaciones de importación y exportación basadas en sus ubicaciones relativas. Esto les permitió explorar la posición estructural que ocupaban las diferentes comunidades, las oportunidades que se derivaban de su posición en la red y, además, analizar qué ocurría si se eliminaba una de ellas —como sucedió con la erupción volcánica en la antigua isla de Tera, actual Santorini (Grecia). En este tipo de estudios, las relaciones espaciales se muestran explícitamente, ya que el propósito es precisamente comprender cuáles son sus implicaciones.

De hecho, es común encontrar en la literatura especializada numerosos estudios que teorizan acerca de los patrones y dinámicas de interacción entre diversos lugares y comunidades para distintos periodos y contextos geográficos (Terrell, 1977; Broodbank, 2000; Bevan & Wilson, 2013; Collar, 2013; Tartaron, 2013; entre otros). Estos supuestos se fundamentan en la idea de que las comunidades que habitan en relativa proximidad o que comparten ciertos rasgos de similitud tienden a mantener relaciones de influencia mutua. Estas relaciones, ya sean directas o indirectas, poseen un componente espacial evidente, en el que parámetros como la proximidad, la distancia a recorrer o las áreas de influencia juegan un papel determinante. En este contexto, resulta esencial representar explícitamente dichas relaciones a través de distintas escalas espaciales y temporales, lo que permite identificar patrones y dinámicas que contribuyan a validar las hipótesis planteadas.

En el marco de esta investigación, se adoptó la metodología propuesta por Brughmans y Peeples (2020, 2023), que permite emplear diferentes tipos de modelos de redes espaciales para representar los supuestos planteados. Estos modelos se dividen principalmente en dos categorías: aquellos basados en la distancia euclidiana (*K-Nearest Neighbors* y *Maximum Distance Networks*) y los obtenidos mediante el análisis de regiones de influencia (*Relative Neighbourhood Networks*, *Gabriel graphs* y *β-skeletons*). En esencia, estos modelos permiten representar, mediante geometría computacional, las interacciones hipotéticas entre nodos (sitios arqueológicos) y examinar la configuración y estructura de las relaciones entre ellos. Estas aproximaciones son especialmente útiles en arqueología, ya que permiten comparar los patrones de red teorizados con los observados, lo que facilita una mayor comprensión de los complejos procesos de interacción que han marcado la formación y evolución de estos paisajes y sociedades a lo largo del tiempo.

K-Nearest-Neighbors Networks (K-NN)

Una de las primeras aproximaciones que se han empleado, y que es muy común en este tipo de enfoques, es el análisis de red del vecino más cercano, conocido como *K-Nearest Neighbors Networks* (K-NN, en adelante) o, también denominado análisis de punto proximal (PPA) en ciertos contextos (Terrell, 1977; Knappet, Evans *&* Rivers, 2008, 2011; Rodríguez-Rellán *et al.*, 2023; entre otros). El K-NN se basa en la creación de redes mediante una métrica de distancia euclidiana, con el objetivo de identificar el vecino o grupos de vecinos más cercanos a cada nodo (sitios arqueológicos). En esencia, esta aproximación asume que cada nodo está conectado a sus k nodos más cercanos, donde k es un número entero que representa el número de "vecinos" más próximos. Este enfoque puede ampliarse incorporando de manera progresiva diferentes valores de k. Es importante destacar que, para valores menores o iguales a 5 ($k \leq 5$), las redes resultantes se pueden identificar como "planas" (*planar networks*), —i.e., podrían ser representadas en un plano sin que los enlaces se crucen. Por lo tanto, para considerar estas redes los valores k deben ser de 6 o mayores ($k > 5$) (Brughmans *&* Peeples, 2020, 2023).

En este tipo de redes, también es posible distinguir entre la direccionalidad de los enlaces. Por ejemplo, en una red de vecinos más cercanos dirigida, como en este caso, representa los enlaces que van desde un nodo de origen hacia sus vecinos más cercanos. Si ese nodo de destino, a su vez, tiene al nodo de origen como su vecino más cercano, entonces el enlace es bidireccional. Esto implica que la función del vecino más cercano no es simétrica. De hecho, un nodo N_j puede ser el vecino más cercano de N_i, pero N_i puede no ser el vecino más cercano de N_j (Jiménez-Badillo, 2023: 166). Esta asimetría contradice las percepciones intuitivas de proximidad, especialmente cuando

la densidad de los puntos varía en el espacio. No obstante, es común encontrar casos en los que un nodo más alejado solo envía enlaces, pero no recibe tantos. Esto sucede porque los nodos agrupados tienden a conectarse hacia los nodos más cercanos, en lugar de hacia aquellos situados a mayor distancia.

Redes de Distancia Máxima (MDN)

Para complementar este enfoque, se ha aplicado una segunda aproximación que considera distancias absolutas, conocidas como redes de distancia máxima o *Maximum Distance Networks* (MDN, en adelante). En las redes MDN, cada par de nodos está conectado si se encuentran a una distancia menor o igual a un umbral previamente establecido (Brughmans *&* Peeples, 2020, 2023). En la práctica, tanto los modelos del vecino más cercano (K-NN) como los de distancia máxima (MDN) se utilizan para representar la hipótesis de que los lugares más cercanos entre sí, o dentro de una cierta distancia, tienen más oportunidades de interactuar que aquellos más alejados. Por lo tanto, estos enlaces se emplean para representar canales plausibles para el flujo de comunicación e intercambio entre diversas comunidades. De este modo, este enfoque complementa otras aproximaciones y medidas relacionales exploradas a lo largo de esta investigación, como las medidas indirectas basadas en los costes o fricción y los tiempos de desplazamiento (véase Cap. IV, 4.2.2 Correlaciones espaciales entre factores humanos y no humanos). No obstante, a continuación, se presenta una alternativa complementaria, basada en regiones de influencia, que se adapta mejor a las variaciones de densidad y a la exploración de las relaciones contextuales.

Relative Neighborhood Networks, Gabriel Graphs y Beta Skeletons

Los modelos anteriores han sido complementados mediante la aplicación de un enfoque alternativo, también basado en redes de proximidad, pero que ofrece mayor flexibilidad. Para ello, en lugar de utilizar la distancia euclidiana, se han definido regiones de influencia basadas en la distancia cuadrática para cada par de nodos a partir de los cuales se generan las redes (*Relative Neighbourhoods Networks*, RNN, en adelante) (Toussaint, 1980; Brughmans *&* Peeples, 2020, 2023; Jiménez-Badillo, 2023). En este enfoque, dos nodos se consideran vecinos relativos y están conectados si no existe ningún otro nodo que esté más cerca de ambos que la distancia que hay entre ellos. Este concepto se puede visualizar dibujando un círculo alrededor de cada nodo, con un radio igual a la distancia entre ellos. Si la intersección en forma de lente o "almendra" de estos círculos no contiene ningún otro nodo, entonces se consideran vecinos relativos (Figura 5.8a) (Jiménez-Badillo, 2023: 169). Esto significa que, para cada par de nodos, se verifica que dentro de la región de influencia compartida por ambos no haya ningún otro. A diferencia del vecino más cercano (K-NN), este modelo (RNN) es más sensible a las variaciones de densidad en la distribución espacial, ya que tiene en cuenta la presencia de otros nodos en el entorno inmediato.

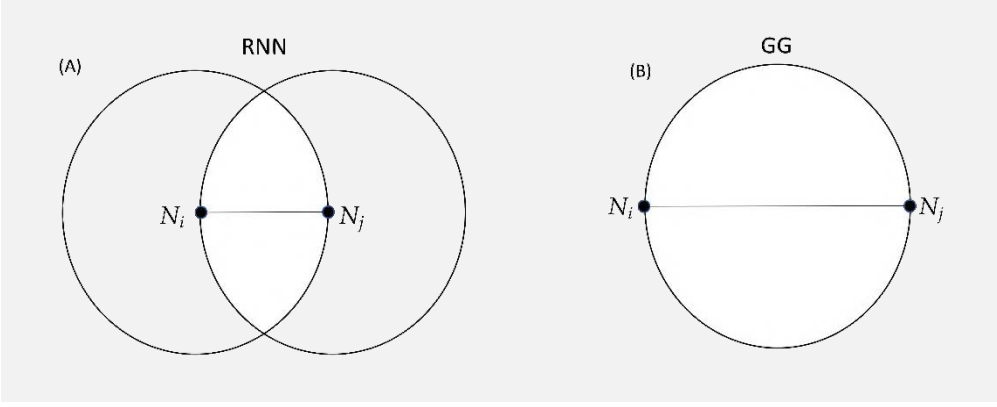


Figura 5.8. Representaciones gráficas que ejemplifican la definición de las regiones de influencia para los modelos de vecindad relativa (*Relative Neighborhood Networks,* RNN) (A) y Grafo de Gabriel (*Gabriel Graphs*, GG) (B) (Modificado a partir de Brughmans *&* Peeples, 2020: 281).

En esta misma línea, aplicando un principio similar, pero utilizando una región circular entre cada par de nodos, se obtiene lo que se conoce como grafo de Gabriel (*Gabriel Graphs*, GG). En este enfoque, dos nodos están conectados si no hay otros nodos dentro del círculo cuyo diámetro es igual a la distancia entre ellos (Figura 5.8b). Tanto en el modelo de vecindad relativa (RNN) como en el grafo de Gabriel (GG), los resultados generan un único conjunto de conexiones (enlaces) a partir de los nodos y sus respectivas ubicaciones. Esto es particularmente útil para explorar las propiedades estructurales básicas de los procesos de interacción, ya que proporcionan una representación de sus componentes fundamentales y las relaciones espaciales entre ellos.

Finalmente, este enfoque de proximidad relativa puede ajustarse utilizando los llamados *β-skeletons* (Kirkpatrick *&* Radke, 1985; Brughmans *&* Peeples, 2020; 2023; Jiménez-Badillo, 2023). En este caso, es posible definir un conjunto de regiones de influencia alrededor de los nodos, donde la forma y el tamaño de estas regiones están controlados por un valor numérico denominado beta (β). Cuando β se aproxima a cero, delimita una pequeña región cuyo vacío es necesario para que pares de nodos (N_i) y (N_j) sean considerados vecinos. A medida que β aumenta, la región de influencia se expande, y así sucesivamente. De este modo, la "vecindad" β se establece dentro de un rango de límites mínimo y máximo. Este enfoque contrasta con la noción de áreas de influencia fijas definidas para RNN y GG, ya que aplicando distintos valores β, es posible generar un espectro de redes con densidades variables (Jiménez-Badillo, 2023). Así, obtenemos diferentes estructuras de red, donde los valores más bajos generan redes más densas, mientras que valores más altos producen redes más dispersas. Cuando $\beta = 1$, coincidiría con el GG — i.e., el diámetro de los círculos es igual a la distancia entre los nodos.

5.4 ESTUDIOS DE CASO

Cualquier investigación arqueológica que pretenda aplicar este tipo de enfoques y aproximaciones debe partir de un estudio exhaustivo y en profundidad de la región en cuestión. Esto implica una comprensión detallada de las características arqueológicas, históricas y medioambientales que la definen. Además, es crucial identificar tanto los factores y variables que pudieron haber influido en los procesos de movilidad e interacción como comprender la evolución de estos paisajes. El enfoque adoptado, por tanto, debía facilitar la integración de datos empíricos junto a supuestos teóricos en un marco que permitiera analizar cómo diversos factores y procesos interdependientes transformaron los paisajes analizados.

En este estudio se examinaron dos regiones geográficas claramente diferenciadas: Creta, una isla con un relieve muy accidentado y una amplia variedad de paisajes típicamente mediterráneos; y, Marmárica, una región de la costa noreste de África principalmente llana y caracterizada por paisajes áridos. En consecuencia, los factores que influyen en estos procesos se basan principalmente: (i) la orografía, que comprende las características físicas y topográficas del terreno, como la elevación, la inclinación, la presencia de valles, llanuras, etc.; y (ii) la red hidrográfica, que incluye ríos, valles fluviales, cuerpos de agua y zonas de captación de estos recursos. Mientras que parámetros como la proximidad, la distancia a recorrer y las áreas de influencia también han sido considerados. No obstante, para un análisis detallado de los resultados obtenidos, primero se aborda la situación documentada en Creta y en Marmárica, para luego llevar a cabo un análisis comparativo que proporcione una visión contextual global de tales procesos a través del Mar de Libia a diferentes escalas espaciales y temporales.

5.4.1 Creta (Grecia)

En el caso específico de Creta, se comienza describiendo cada uno de los procedimientos aplicados y los resultados obtenidos durante las distintas etapas de este estudio, en las que, como se ha señalado, se distinguen claramente una fase (re)constructiva inicial y una segunda fase analítica. Esta distinción metodológica proporciona un enfoque más estructurado y sistemático para abordar este caso. En la primera fase, aunque conceptualmente se identifican una serie de pasos claramente diferenciados, en la práctica estos fueron implementados mediante código en Python —i.e., lenguaje de programación— integrado con ArcGIS (v.10.5). Este enfoque permitió tanto optimizar la gestión de datos de distinta naturaleza como la automatización de todo el proceso. El empleo de código resulta especialmente relevante en este contexto, ya que garantiza la transparencia, la comunicación y la reproducibilidad de los modelos empleados. Esto se alinea con la práctica de las "metodologías abiertas", que promueven la accesibilidad y facilitan el reanálisis de los planteamientos y aproximaciones de investigación.

Por lo tanto, en un primer nivel, se estableció y configuró el entorno de trabajo a partir de la delimitación del área de estudio (la totalidad de la isla de Creta), un modelo digital de elevación (EU-DEM) con una resolución de 25 metros y la red hidrográfica que abarca toda la región. En relación con este último aspecto, se llevó a cabo un trabajo exhaustivo utilizando herramientas hidrológicas y datos de teledetección implementados en el propio SIG. Este enfoque tuvo como propósito modelar estos sistemas y obtener una representación precisa de las áreas con mayor potencial de acumulación de flujo e inundabilidad, caracterizadas por la estacionalidad típica de los entornos mediterráneos (Figura 5.9).



Figura 5.9. (*Arriba*) Establecimiento del entorno de trabajo mediante código. (*Abajo*) En la figura se muestra la totalidad de la isla de Creta representada mediante un modelo digital de elevación (EU-DEM) con una resolución de 25 metros, junto con la red hidrográfica, que destaca las zonas con mayor acumulación de flujo, generadas en el contexto de esta investigación.

Dado que el objetivo era generar una superficie de coste acumulado (ACS) que integrara el coste o fricción al desplazamiento, el siguiente paso consistió en cuantificar el impacto que los factores, principalmente las características topográficas y la red hidrográfica, pudieron haber ejercido sobre la movilidad en la región. Este proceso implicó el cálculo de la pendiente en porcentajes, ya que, a mayor inclinación, mayor es el coste asociado al desplazamiento. Asimismo, se asignó una resistencia específica al cruce de la red hidrográfica. Para ello, se creó un área de influencia (*buffer)* de 100 metros a cada lado de la red, calculado en base a la distancia euclidiana, y mediante un condicional se asignó un coste gradual de hasta un máximo de un 15% (Figura 5.10).

A continuación, se integró la regla de Naismith (1892) a la capa resultante para transformar estos valores en función de un algoritmo que representase el desplazamiento humano. Según esta función, una persona adulta puede cubrir unos 5 km/h en terreno llano, lo que equivale a recorrer un kilómetro en aproximadamente 12 minutos. No obstante, por cada 10 metros de desnivel (o un 1% de pendiente), se añade un minuto al tiempo de desplazamiento, lo que representa un incremento del 8,33% en el coste. Por ejemplo, una pendiente del 12% duplicaría el coste en comparación con una superficie llana. Con una pendiente del 0%, el coste es 1, y aumenta en 0,0833 por cada 1% adicional de pendiente. Para reflejar estos cálculos, se utilizó la fórmula X = 0,0833 * P + 1, donde *P* es la pendiente expresada en porcentaje y *X* es el coste de fricción. Esto ha proporcionado una visión más clara y realista de cómo las características del entorno podrían haber influido en los patrones de movilidad (Figura 5.11).



Figura 5.10. Procedimiento para el cálculo de la pendiente (en porcentajes) y la asignación de un coste gradual al cruce de la red hidrográfica.

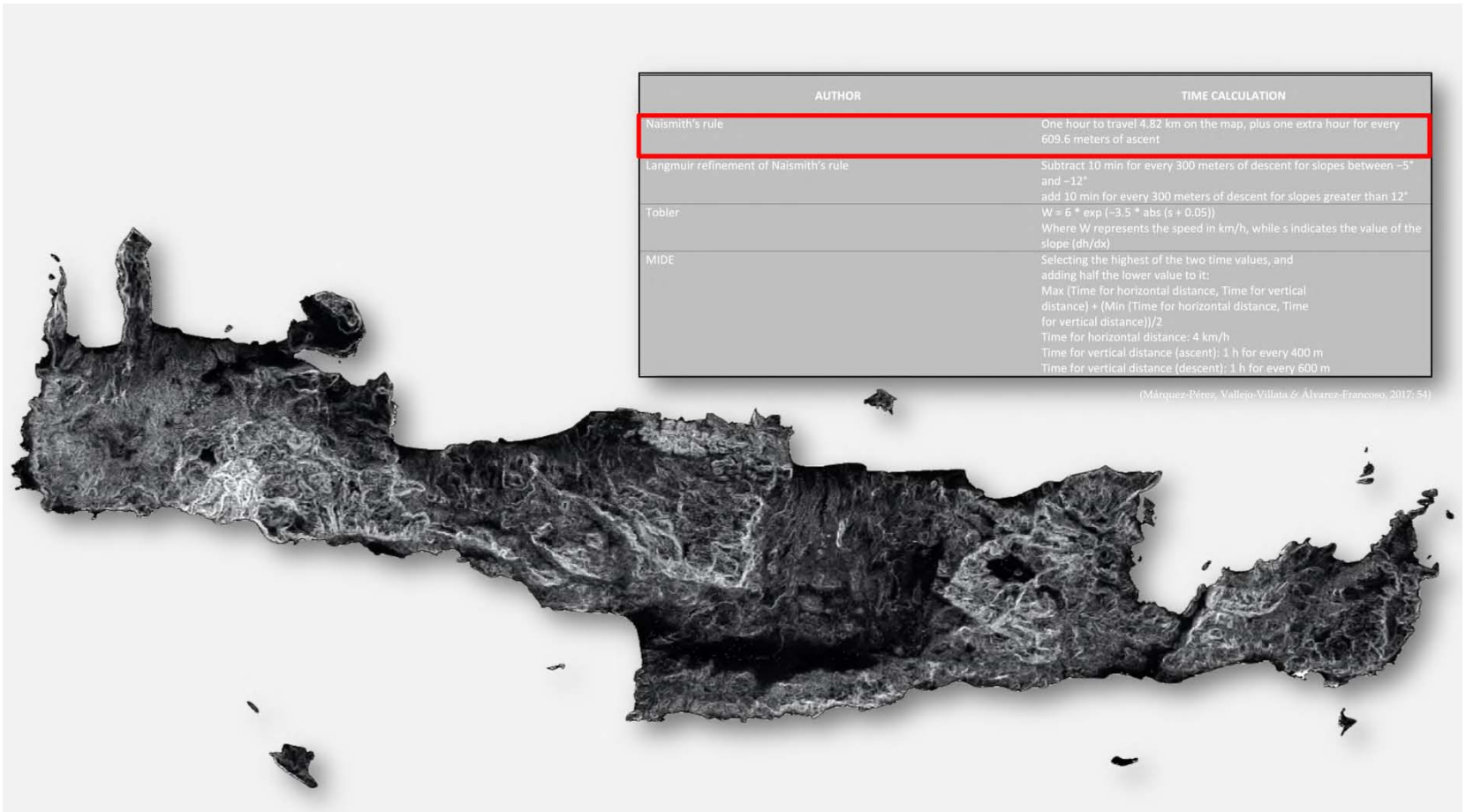


Figura 5.11. (*Arriba*) Representación de diferentes funciones de desplazamiento. En rojo, se destaca la regla de Naismith, la cual hemos aplicado para transformar los valores a una función de un modelo de desplazamiento humano realista.

Una vez obtenida la capa de superficie de coste o mapa de fricción final (ACS), generamos una malla o *grid* de puntos con una separación de 5 km entre ellos, cubriendo uniformemente toda el área de estudio. En total, se crearon 331 puntos simulados que representaban los lugares de destino (Figura 5.12). Al evitar el uso de ubicaciones de sitios arqueológicos previamente documentados, se buscaba evitar introducir posibles sesgos en el modelo, permitiendo un enfoque exploratorio en el que el propio modelo posibilitara revelar patrones y áreas de interés sin estar condicionado por las localizaciones de dichos emplazamientos. Por lo tanto, esta decisión se fundamentó principalmente en el objetivo de generar modelos independientes no tan condicionados y que pudieran ser posteriormente comparados. Con la malla y el mapa de fricción integrados, se procedió a ejecutar la secuencia de operaciones que conlleva el FMN.

Como se ha señalado en este capítulo, este método implica la aplicación secuencial de herramientas de coste-distancia y análisis hidrológico, basándose en una superficie de coste o fricción para evaluar posibles trayectorias. Esto permite identificar rutas potenciales o corredores de movilidad que estructuran el paisaje, estableciendo patrones sobre cómo un individuo o grupo de individuos podrían haberse desplazado a través de distintos territorios en función de determinados factores. Este enfoque es clave tanto para comprender la topología de las redes de movilidad y la accesibilidad de determinadas áreas como para obtener valores de acumulación de flujo (intensidad de circulación), que facilitan explorar dinámicas y patrones de interacción.



Figura 5.12. Representación de la malla o *grid* de puntos (301 puntos de destino) que cubre uniformemente la totalidad de Creta, con una separación de 5 km entre ellos.

Una vez iniciado el análisis, el proceso se repite para cada uno de los puntos de destino creados, lo que genera numerosos archivos ráster en cada cálculo —i.e., *Cost Distance, Flow Direction* y *Flow Accumulation*. Con 301 puntos de destino, esto se tradujo en un total de 903 ráster (tres por punto) para este estudio de caso específico. Este aspecto es relevante, ya que tiene implicaciones logísticas tanto en términos de procesamiento como de almacenamiento. Por lo tanto, es fundamental que cualquier arqueólogo/a que desee emplear este tipo de aproximaciones sea consciente del tiempo y coste computacional involucrados. Los análisis pueden necesitar varios días y generar una gran cantidad de peso en archivos, lo que hace crucial considerar el hardware disponible al seleccionar parámetros como la resolución del modelo digital de elevación o el número de puntos a procesar.

Finalmente, para generar la red integrada, se realizó la media de todas las capas ráster de acumulación de flujo creadas para cada punto, obteniendo como resultado un único archivo ráster en el que se puede visualizar la red de rutas o corredores potenciales que articulan la movilidad en toda la isla (Figura 5.13). En esta capa ráster, cada celda contiene un valor que representa el coste acumulado de desplazamiento desde cualquier lugar del área de estudio hacia cada punto de destino. De este modo, a través de la representación de estas rutas potenciales, se pueden identificar los corredores clave que habrían conectado diferentes zonas, destacando las rutas y áreas que presentaban menor coste y, por lo tanto, mayor accesibilidad. Esto no solo ha ayudado a interpretar la movilidad en la totalidad de la isla de Creta, sino que también ha proporcionado una base para reconstruir patrones y dinámicas de interacción relacionadas con los flujos de comunicación e intercambio a lo largo de los paisajes que la componen.

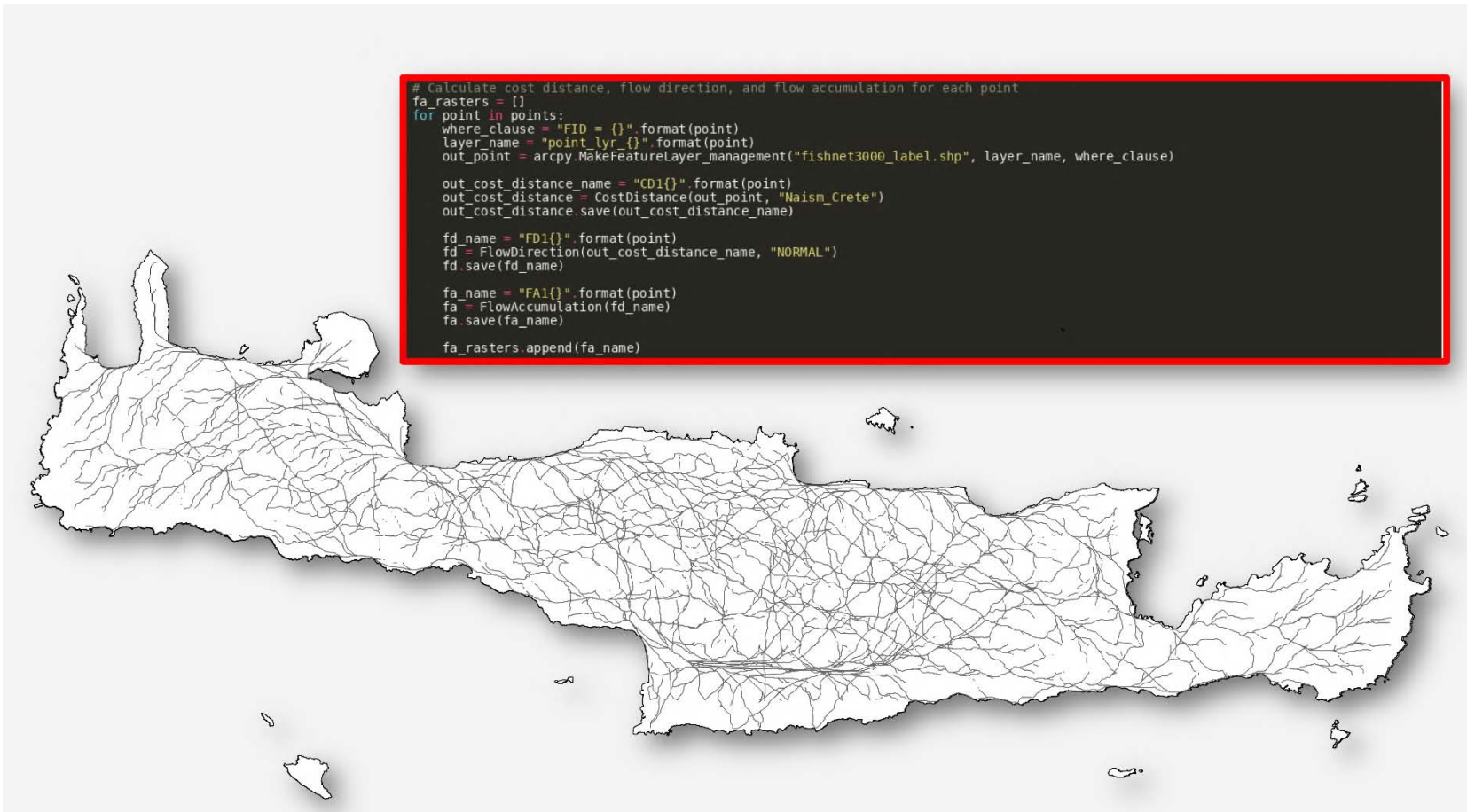


Figura 5.13. (*Arriba*) Secuencia de operaciones que conlleva el FMN. (*Abajo*) Resultados preliminares donde se muestran todas las rutas o corredores potenciales identificados que cubren la totalidad del área de estudio.

Como se aprecia en la figura 5.13, que muestra los resultados preliminares tras la aplicación del FMN, se generan una gran cantidad de rutas debido a la naturaleza y funcionamiento de este tipo de análisis, lo que puede dificultar la interpretación de los resultados. Por esta razón, es necesario realizar una serie de operaciones para conservar únicamente los trazados más significativos, es decir, aquellos que representan un mayor potencial de movilidad. Para ello, es preciso reclasificar los valores de acumulación obtenidos según determinados umbrales (ráster) para derivar la red (vector). En este sentido, Llobera, Fábrega-Álvarez y Parcero-Oubiña (2011: 4) señalan que no existe una regla estricta para determinar el umbral a utilizar, ya que diferentes umbrales permiten identificar distintas jerarquías dentro de estas estructuras. Sin embargo, realizan una propuesta basada en el tamaño del área de estudio, la resolución del píxel y la densidad deseada para el análisis.

En este caso, al contar con estudios previos que han aplicado esta metodología, se recurrió a los parámetros establecidos en varias de estas publicaciones, como la de Ladislav Stančo y Adam Pažout (2020) y, especialmente, el trabajo de Sylviane Déderix (2016), *Traveling across archaeological landscapes: The contribution of Hierarchical Communication Networks*, que emplea la misma metodología en un caso específico en la llanura de Mesará, en la zona sur-central de Creta, para el Bronce Antiguo. En ambos estudios, se aplica una reclasificación basada en la desviación estándar ¼, la cual se ha seguido, obteniendo como resultado solo aquellas rutas o corredores principales con mayor potencial de movilidad (Figura 5.14). Asimismo, dado que el interés radica en explorar la fortaleza de las conexiones en función de su intensidad, también se han configurado estos valores para destacar aquellos corredores con mayores valores de acumulación, es decir, mayor circulación potencial (Figura 5.15).

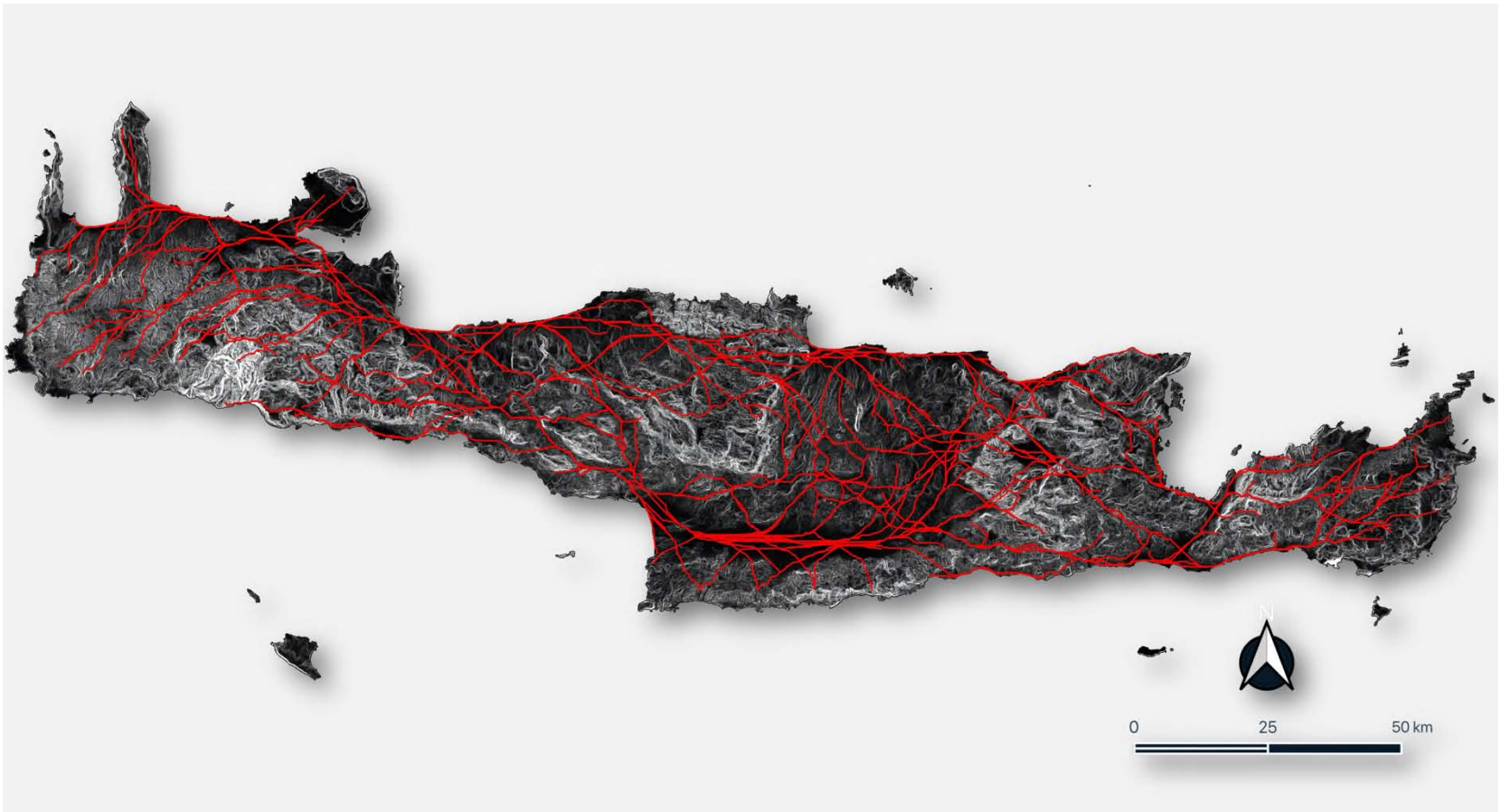


Figura 5.14. Resultados finales tras aplicar un procedimiento de reclasificación estadística (desviación estándar ¼) para obtener únicamente las rutas o corredores con mayor acumulación de flujo, es decir, aquellos con mayor potencial de movilidad.

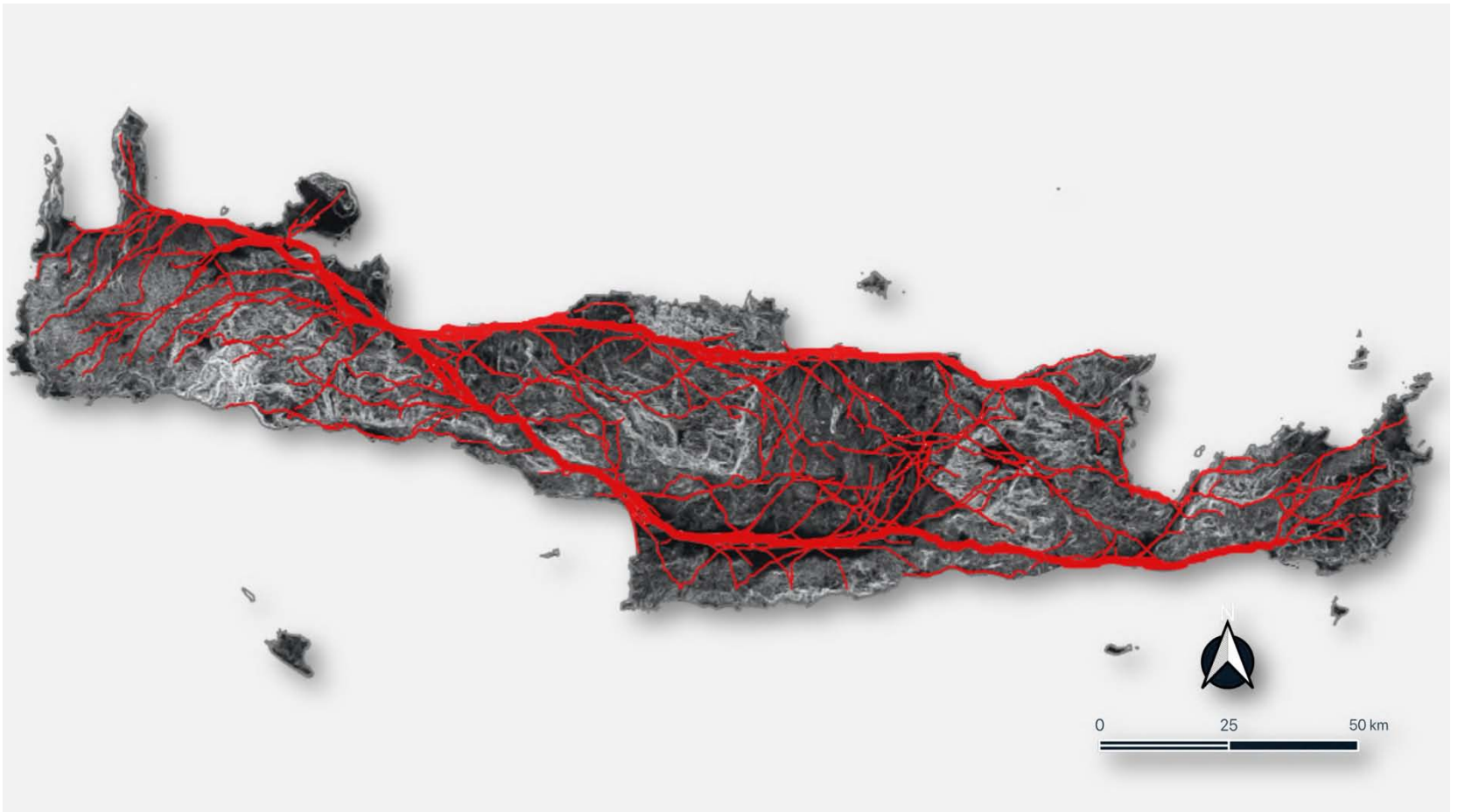


Figura 5.15. Representación gradual de los corredores con mayor acumulación de flujo, indicando las áreas con mayor potencial de circulación.

Como resultado, en términos generales se observa una mayor conectividad en las áreas costeras en comparación con las del interior. Este patrón es consistente, salvo algunas excepciones, como en la costa sur-central, donde las montañas Asterousia actúan como una barrera natural entre el Mar de Libia y las partes interiores de la isla. En este caso, los flujos de movilidad se canalizan a través de áreas cercanas, como la llanura de Mesará, que actúa como un paso natural y se convierte en un punto estratégico para el tránsito entre distintas zonas. Por otro lado, las rutas o corredores con mayores valores de acumulación, es decir, con mayor potencial de circulación, siguen dos corredores principales. El primero recorre el eje oeste-este a lo largo del litoral norte, comenzando en el área de La Canea y conectando puntos clave mediante pasos o corredores naturales como el desfiladero de Selinari, que enlaza la parte norte-central de la isla con la zona de Agios Nikólaos y, desde ahí, continúa hasta la bahía de Mirabello, donde se ramifica hacia las regiones más orientales en el área de la actual Sitia. El segundo corredor sigue una trayectoria similar al primero, pero se bifurca desde Apokóronas hacia el sur, conectando con la llanura de Mesará, donde se registran los mayores valores de acumulación de flujo de toda la isla. Desde ahí, continúa por la costa sur hasta Ierapetra, enlazando finalmente con las zonas más orientales de la isla.

En términos de accesibilidad, las zonas conectadas por estos corredores presentan una ventaja significativa en comparación con otras áreas. Esto se evidencia claramente al observar que importantes centros de ocupación y actividad humana durante los periodos considerados, como Kydonia, Cnossos, Phaistos, Kommos, Gortyna, Mochlos o Palaikastro, están estratégicamente ubicados juntos a estos corredores principales de circulación. Esta ventaja se refleja en la dinámica socioeconómica de estos lugares, donde la accesibilidad podría haber facilitado el crecimiento de estas

comunidades. En consecuencia, la proximidad a estas vías parece estar directamente vinculada con el desarrollo socioeconómico de las áreas mencionadas. Esto sugiere que la accesibilidad fue un factor clave que impulsó el crecimiento económico y la complejidad social en estas regiones, al permitir continuos flujos de comunicación e intercambio entre diferentes lugares.

Estos resultados permiten responder de manera clara a algunas de las preguntas de investigación planteadas, ofreciendo una visión detallada sobre los patrones históricos de movilidad y ocupación en Creta. En primer lugar, los corredores más probables para llegar a destinos específicos están determinados por la accesibilidad, que es mayor en las zonas costeras y en los valles que conectan el norte y el sur central. Asimismo, al comparar diferentes áreas, se observa que los principales centros de ocupación y actividad humana de la isla durante los periodos considerados están ubicados estratégicamente en puntos clave vinculados a las rutas de mayor circulación potencial.

Esto sugiere que la accesibilidad no solo facilitó la movilidad entre distintas áreas, sino que también pudo influir en la ubicación y distribución de los asentamientos en torno a estos ejes de comunicación. Además, las rutas de movilidad identificadas corresponden principalmente a corredores naturales que las sociedades cretenses habrían aprovechado para conectar diferentes partes de la isla, creando una red histórica de caminos que facilitaba la interacción entre comunidades. Por lo tanto, al identificar estas estructuras, se ha podido comprender mejor la ordenación y estructuración del paisaje. Esto implica una comprensión multiescalar de los patrones de movilidad, destacando cómo las interacciones entre los elementos naturales y los factores

relacionados con la actividad humana se entrelazaban para dar forma al desarrollo y expansión de estas comunidades.

No obstante, como se ha destacado, este estudio no se ha limitado únicamente al estudio arqueológico de las rutas. En línea con el marco teórico de esta investigación, estos lugares de ocupación y actividad humana, junto con las rutas, caminos y corredores históricos de movilidad identificados, se conciben como parte de una red interconectada. Esto permite que dichos elementos se combinen, creando trayectorias flexibles dentro de estructuras que pueden recorrerse en cualquier dirección, no solo en función del trayecto más corto o eficiente. Adoptar este enfoque de red transforma la manera de analizar estos procesos: mientras que las superficies de coste o fricción consideran la totalidad del espacio transitable, una red representa un conjunto de elementos y estructuras que articulan los flujos de comunicación e intercambio a distintos niveles y escalas. Aunque este enfoque podría parecer que presenta ciertas desventajas teóricas al excluir la interacción fuera de estas redes, ofrece ventajas analíticas significativas, como se expone a continuación.

En particular, durante una segunda fase de este estudio, se llevó a cabo el análisis exploratorio y la modelización teórica de estas redes, lo que permitió examinar tanto su topología como sus propiedades estructurales fundamentales. Este análisis prestó especial atención a fenómenos como la centralidad y la conectividad, así como a la representación explícita de las relaciones y dinámicas de interacción a lo largo de los diversos periodos analizados. Siguiendo el mismo esquema utilizado para detallar los procedimientos y resultados obtenidos durante la fase (re)constructiva, se procede ahora a abordar la fase analítica en el caso de Creta. En primer lugar,

se examina el análisis exploratorio, y posteriormente, se presentan los modelos de redes espaciales generados.

Para proceder con la fase analítica de este estudio, fue necesario realizar una serie de operaciones adicionales sobre las rutas o corredores de movilidad generados, que incluyeron: (i) revisar las intersecciones sin continuidad y los segmentos fragmentados; (ii) crear nodos en cada punto de inicio y final de cada tramo de ruta registrando sus coordenadas geográficas (latitud y longitud); y, finalmente, (iii) integrar los valores de acumulación (ráster), asociándolos a cada tramo de ruta correspondiente (vector). Posteriormente, para ampliar la capacidad analítica del estudio, se calcularon diversas métricas a partir de los valores de acumulación, que incluyen el área, el número de celdas, la suma, la media, la desviación estándar, el rango y la longitud para cada tramo (Figura 5.16).

Una vez realizados estos procedimientos, se procedió al análisis exploratorio de las redes desde dos enfoques y aproximaciones independientes, aunque complementarias. El primero consistió en un estudio de la red en su conjunto, centrado en el rol que desempeña cada tramo, es decir, la función específica ejercida por cada ruta dentro de la dinámica general de la red. Para ello, se partió de los valores de acumulación de flujo obtenidos, los cuales permitían inferir la circulación potencial a lo largo de la red, en combinación con el paquete de aplicaciones sDNA (*Spatial Design Network Analysis*). Este tipo de herramientas permitió conceptualizar y evaluar las rutas como entidades dentro de la red espacial, facilitando el análisis de métricas clave, como el grado de centralidad, intermediación y cercanía.

El grado de centralidad (*degree centrality*) se utilizó para medir la conectividad total dentro de un radio específico de la red a distintas escalas, en este caso, a 20 y 50 km. Esta métrica contabiliza el número de conexiones en cada intersección o cruce dentro de ese radio, ponderando el peso de cada una según la suma de los valores de acumulación (intensidad de circulación) (Figura 5.17). Por otro lado, el grado de intermediación (*betweenness centrality*) ha sido esencial para identificar rutas clave dentro de la red, es decir, aquellas que actúan como ejes fundamentales de conectividad. Esta métrica se empleó para evaluar la frecuencia con la que una ruta se utiliza como paso intermedio para conectar diferentes partes de la red, lo cual ayuda a destacar los corredores más frecuentemente transitados. Estos corredores estratégicos suelen ser vitales para la estabilidad y funcionalidad de la red, ya que su interrupción podría fragmentar el flujo de comunicación e intercambio (Figura 5.18, arriba). Finalmente, el grado de cercanía (*closeness centrality*) ha aportado una perspectiva distinta al centrarse en la accesibilidad de cada ruta dentro de la red. Esta métrica se empleó para medir la proximidad de cada ruta en relación con todas las demás, facilitando el acceso rápido y directo entre diferentes zonas (Figura 5.18, abajo).

Este análisis exploratorio ha permitido realizar una evaluación integral de las redes de movilidad históricas en Creta, identificando tanto la conectividad general de la red como los corredores estratégicos (por su centralidad en la intermediación) y aquellos que optimizan la movilidad directa (por su centralidad en la cercanía). Estas métricas, calculadas en función de los valores que reflejan la circulación potencial, han sido fundamentales para comprender cómo estas redes influyeron en las dinámicas socioespaciales y en la estructura territorial de la isla, así como en los patrones históricos de movilidad que se desarrollaron a lo largo del tiempo.

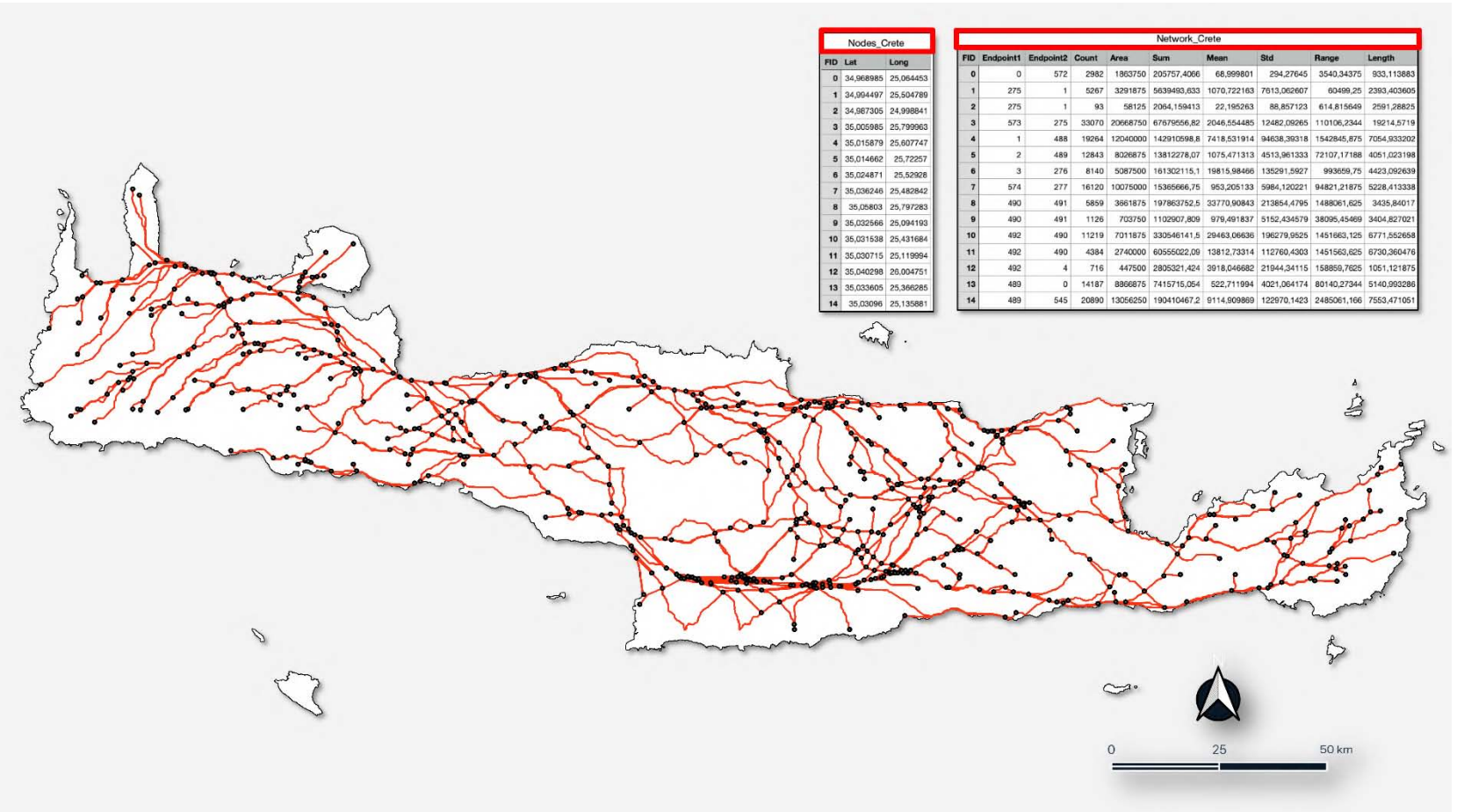


Figura 5.16. Representación de las redes de movilidad de la isla de Creta, con nodos de unión el inicio y final de cada tramo de ruta, junto con la integración de los valores de acumulación asociados a cada segmento. Se incluyen distintas métricas asociadas como atributos, tales como el área (*Area*), longitud (*Length*), suma (*Sum*), media (*Mean*), desviación estándar (*Standard deviation*), y rango (*Range*).

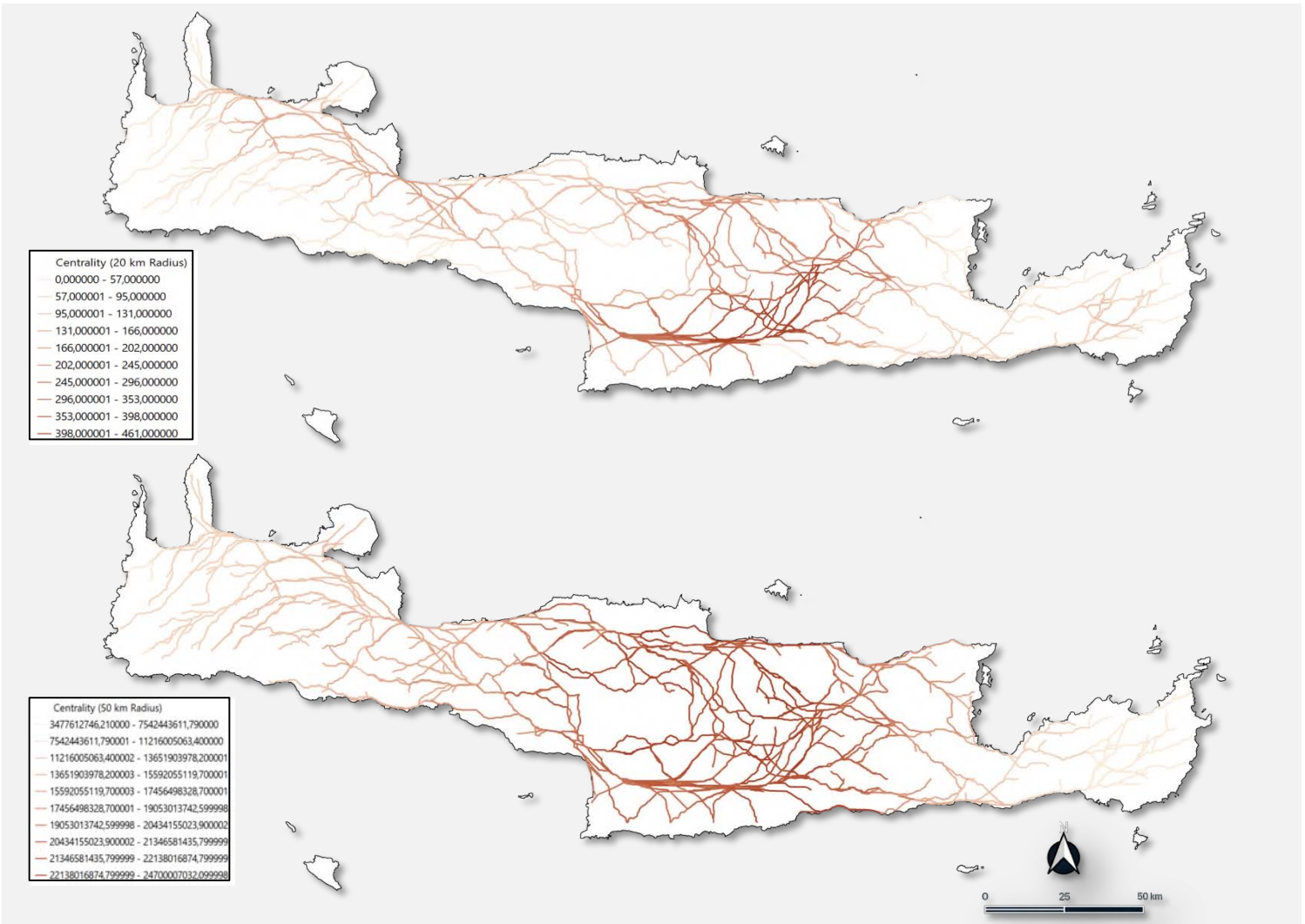


Figura 5.17. Análisis del grado de centralidad (*degree centrality*) con radios de 20 km (arriba) y 50 km (abajo). La centralidad se evalúa considerando la fortaleza de las conexiones en función de su potencial (intensidad) de circulación, en función de los valores de acumulación. Se observa una mayor conectividad en la zona norte-central (Heraclión y su periferia) y en la región sur-central de la isla (Llanura de Mesará). indicando áreas. clave para la movilidad y la interacción en Creta.

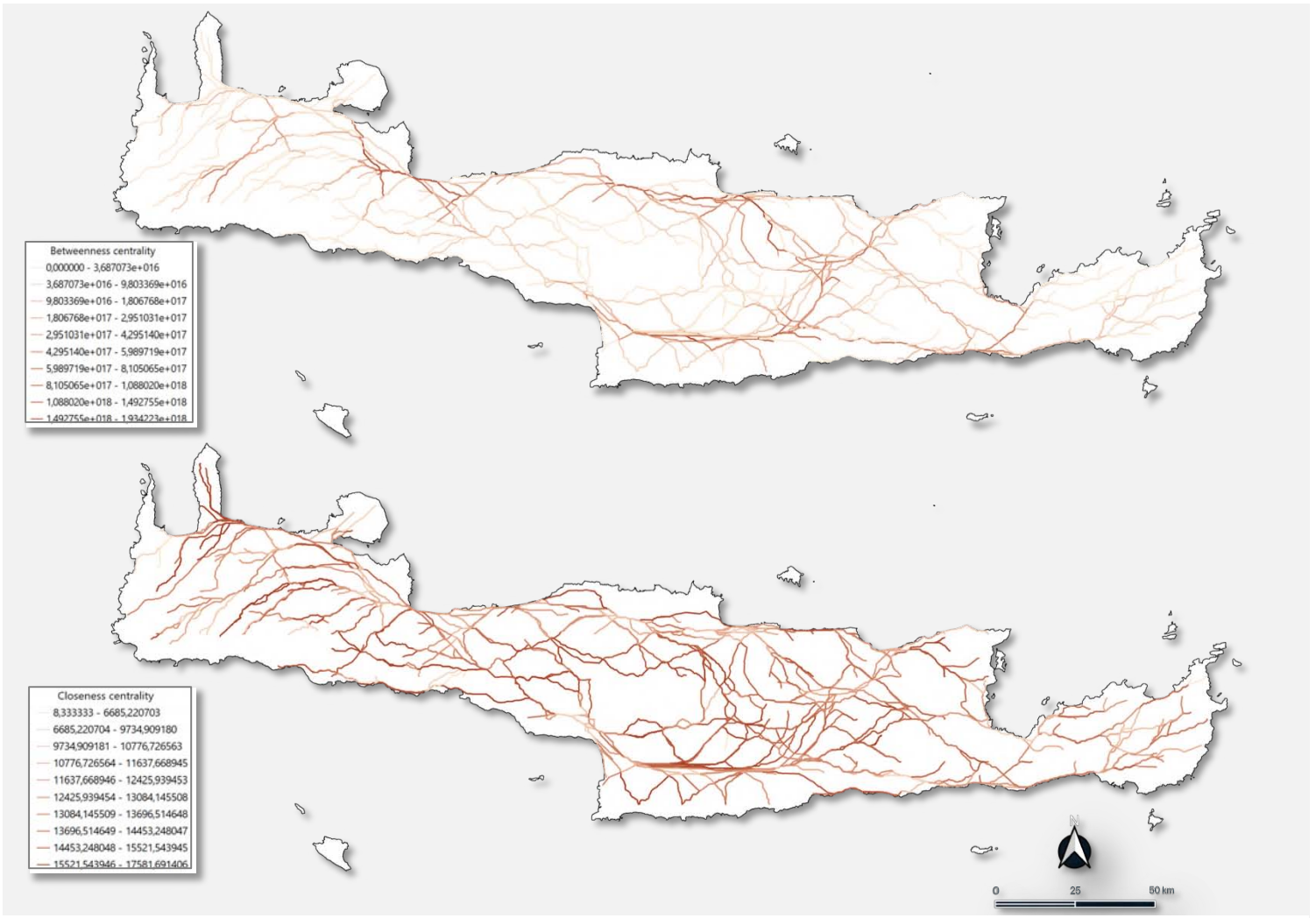


Figura 5.18. Análisis del grado de intermediación (*betweenness centrality*) (arriba) y grado de cercanía (*closeness centrality*) (abajo) aplicados a un radio de 20 km. En ambas representaciones, se observa la red completa de movilidad de la isla de Creta, destacando los corredores estratégicos que facilitan la intermediación en las rutas (alta centralidad en intermediación) y aquellos que optimizan la movilidad directa entre distintas áreas (alta centralidad en cercanía).

En un segundo nivel de análisis, se ha profundizado en la exploración de estas redes desde diversos enfoques, con el objetivo de proporcionar una visión integral y detallada de la estructura y las interacciones entre sus componentes fundamentales. Así, al igual que se ha evaluado cada tramo de ruta, los nodos y sus conexiones (enlaces) también han sido examinados en términos de centralidad. Esto ha facilitado el análisis del papel que estas entidades desempeñan para garantizar la accesibilidad y conectividad general de la red. Por ejemplo, si un nodo con alto grado de intermediación se ve comprometido o eliminado, podría afectar la eficiencia y cohesión de la red, impactando el flujo de movilidad e interacción. En este contexto, mientras que los enlaces destacan la importancia de ciertas conexiones, los nodos representan puntos estratégicos clave que aseguran la fluidez y continuidad de las interacciones. Así, la combinación de estos enfoques ha sido clave para explorar las propiedades y características de estas estructuras de movilidad históricas.

En el caso de Creta, el análisis exploratorio de sus redes ha permitido evaluar, mediante el examen de sus componentes, el papel desempeñado por determinadas entidades, como puntos centrales o nodos estratégicos (Figura 5.19), así como la función de las conexiones entre ellos (Figuras 5.20 y 5.21), tanto en términos de accesibilidad como de conectividad regional. Esto ha proporcionado una visión global sobre el funcionamiento interno de estas estructuras, revelando patrones históricos de interacción desarrollados por estas sociedades a lo largo del tiempo. Además, la identificación del papel desempeñado por estos elementos ha sido clave para comprender la influencia de estas redes en los flujos de comunicación e intercambio dentro de los sistemas analizados, y así evaluar su impacto potencial en la configuración socioespacial de estos lugares.

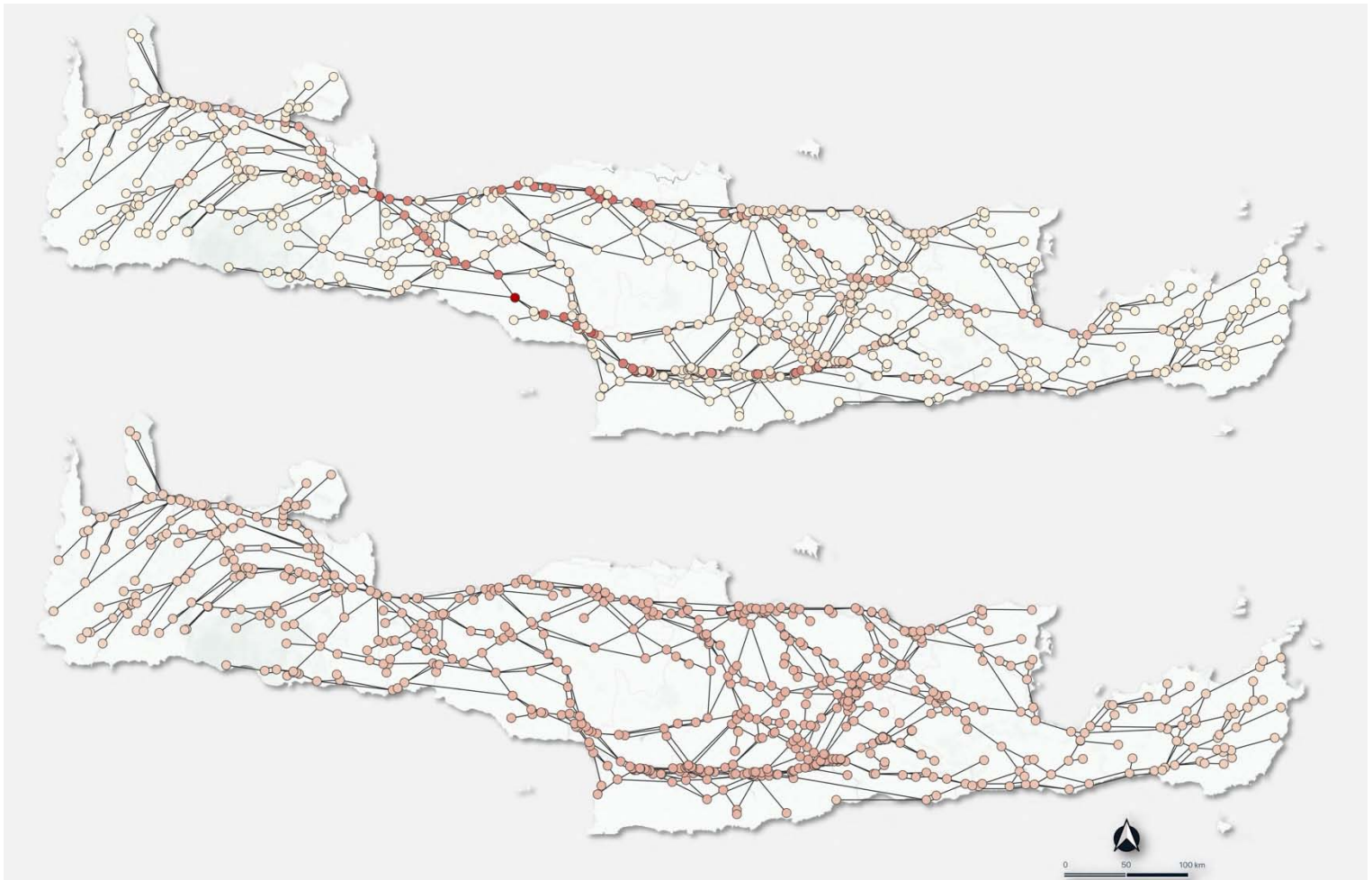


Figura 5.19. Representación de la red de movilidad de Creta mediante nodos y enlaces, en la que se evalúa específicamente el papel de los nodos como puntos clave de intersección. (*Arriba*) Los nodos están representados según su grado de intermediación (*betweenness centrality*), mostrando valores más altos a lo largo de los dos corredores principales que conectan las distintas partes de la isla, lo que destaca su papel clave en la conectividad regional. (*Abajo*) Los nodos se representan de acuerdo con su grado de cercanía (*closeness centrality*), con los valores más altos concentrados en la zona central, reflejando una mayor accesibilidad en estas áreas.

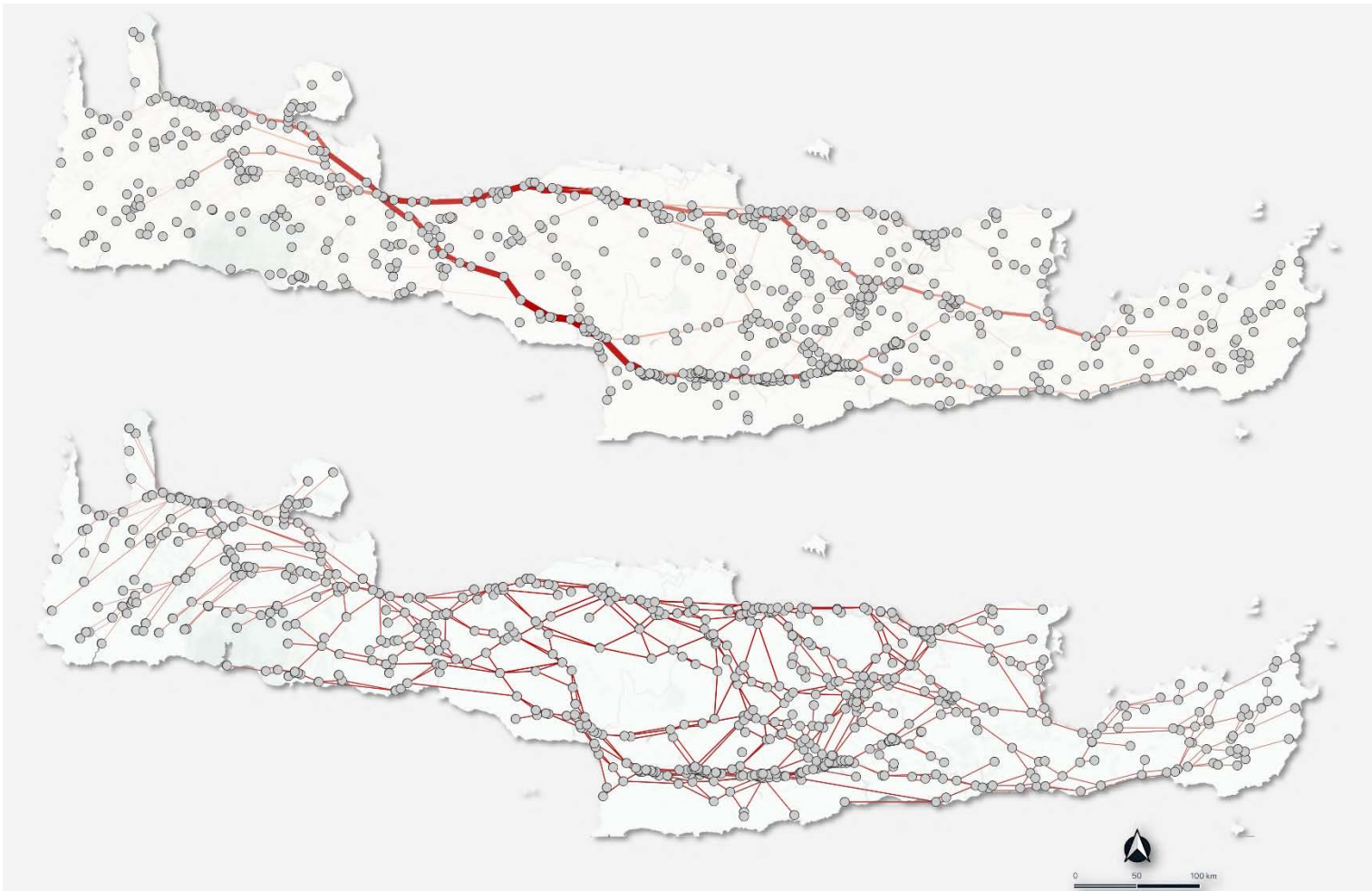


Figura 5.20. Representación de la red de movilidad en Creta, centrada en el análisis de las conexiones (enlaces). (*Arriba*) Los enlaces están representados según su grado de intermediación, destacando los enlaces clave que conectan los corredores principales. (*Abajo*) Los enlaces se muestran de acuerdo con su grado de cercanía, con los valores más altos concentrados en la zona central, lo que indica las conexiones clave para acceder a distintas áreas.

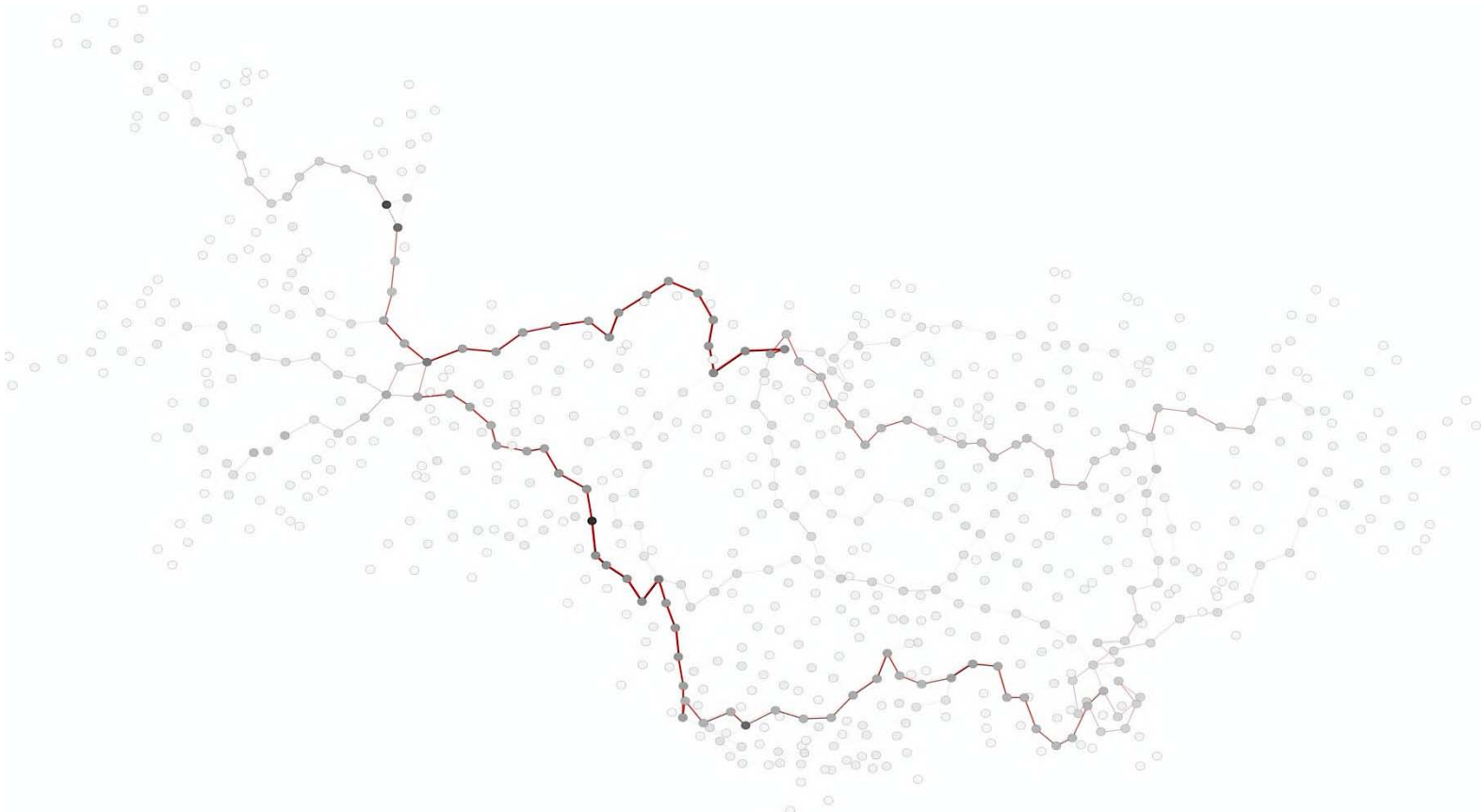


Figura 5.21. Representación de la red de movilidad de la isla de Creta. Los nodos (gris) han sido liberados de su posición geográfica original, lo que permite visualizar su posición en función de la fortaleza de sus conexiones. Se observan claramente los dos corredores principales que recorren el litoral norte y sur de la isla.

Una vez realizado el análisis exploratorio de las redes, se procedió a la representación explícita de las relaciones y dinámicas de interacción, aplicadas al patrón de localización y distribución de los antiguos asentamientos documentados en el marco de esta investigación. Para ello, se utilizaron distintos modelos de redes espaciales que permitieron representar las interacciones hipotéticas entre nodos (antiguos asentamientos) y examinar la configuración y estructura de las relaciones entre ellos a través de distintas escalas espaciales y temporales. Específicamente, los periodos cronológicos analizados abarcan: el Bronce Final (LBA), inicio de la Edad del Hierro (EIA), Periodo Arcaico (ARC), Clásico (CLA), Helenístico (HEL) y Romano (ROM). A partir de estas consideraciones, se establecieron una serie de preguntas para guiar el análisis, asegurando que los modelos abordaran de manera efectiva aspectos fundamentales, tales como: ¿qué patrones presentan las redes observadas? ¿cómo se ajustan estos patrones a los ya documentados mediante otros enfoques (análisis espacial, sDNA, etc.)? ¿qué tipo de estructura revela el sistema? Para dar respuesta a estas cuestiones, se han empleado diversas representaciones de estas estructuras, comparando la similitud entre las redes teorizadas (basadas en hipótesis) y las observadas (modelos obtenidos).

Cabe destacar que la implementación de estos modelos se ha llevado a cabo a través de la utilización de diversos algoritmos desarrollados específicamente para este propósito e implementados mediante código en Python, los cuales se pueden consultar libremente en las publicaciones asociadas a esta investigación. Adicionalmente, se calcularon y registraron una serie de métricas de red para cada uno de estos modelos, con el fin de analizar la estructura y conectividad entre asentamientos a través de diferentes escalas de análisis. Las métricas evaluadas incluyen:

1. **Número de nodos conectados** (*Nodes*): La cantidad de asentamientos que mantienen una o más conexiones dentro de la red.
2. **Número de enlaces** (*Edges*): Número total de conexiones establecidas entre los asentamientos.
3. **Grado promedio** (*Average Degree*): El valor medio de conexiones por nodo en cada red, indicando el nivel de interacción de los asentamientos.
4. **Densidad de la red** (*Density*): La proporción entre las conexiones existentes y las conexiones posibles, determinando cuán densamente conectada está la red en cada caso.

El primer modelo que se presenta se basa en el cálculo del vecino o vecinos más cercanos (*K-Nearest Neighbors Networks*, K-NN), aplicado a los antiguos asentamientos cretenses identificados en las seis ventanas cronológicas mencionadas. Este modelo es muy sensible a la proximidad entre conjuntos de nodos (asentamientos), lo que permite revelar agrupaciones a diferentes escalas espaciales, especialmente en zonas densamente pobladas. Así, para cada periodo, se seleccionaron los asentamientos correspondientes dentro del área de estudio y se definieron diversos niveles de "vecindad" (valor de k), fijando estos valores en $k = 1, 2, 4$ y 10, que representan los distintos umbrales de conectividad considerados específicamente en este caso.

Una vez establecidos estos parámetros, se calculó para cada asentamiento la distancia euclidiana a todos los demás, seleccionando los vecinos más cercanos según los distintos valores de k. De este modo, cada conexión entre asentamientos se representó mediante un enlace que indicaba la relación espacial entre ellos, pero solo si se encontraban dentro de los distintos umbrales previamente definidos. Esto permitió generar una estructura de red

espacial que modela las conexiones entre asentamientos a lo largo de los distintos periodos examinados, facilitando la identificación de patrones de interacción, desde relaciones inmediatas o locales (k = 1 y 2) hasta estructuras regionales más amplias (k = 4 y 10).

En cuanto a las métricas de red, estas fueron registradas para cada nivel, lo que hizo posible realizar una comparación cuantitativa de los patrones de interacción entre asentamientos tanto en términos espaciales como temporales, donde el número de nodos representa la cantidad de asentamientos, mientras que k determina a cuántos se conectan, generando distintas configuraciones de red (Figuras 5.22 a 5.27 y Tabla 5.1). Estas redes no solo proporcionan una representación visual de cómo se relacionan los asentamientos en distintos contextos temporales, sino que también permiten medir y analizar los componentes clave de estas relaciones. Por lo tanto, estas redes no son únicamente representaciones gráficas, sino herramientas que hacen posible cuantificar y evaluar de forma más precisa los patrones de interacción que subyacen a estas entidades. A continuación, se analizan con mayor detalle cómo varían las conexiones, el grado promedio y la densidad de las redes en función de los niveles de k para cada periodo.

Bronce Final (LBA): El análisis de las redes durante el Bronce Final muestra que, a medida que aumenta el valor de k, también lo hacen las conexiones y el grado promedio, lo que sugiere una estructura cada vez más densa. Con k = 10, el grado promedio es elevado (12.701), lo que indica que los asentamientos mantenían numerosos vínculos, probablemente reflejando un sistema de interacción intenso asociado a un activo intercambio cultural, comercial o económico durante este periodo. Con valores menores de k, como k = 1 y k = 2, el número de conexiones disminuye significativamente, reflejando

interacciones más locales. Estas conexiones probablemente corresponden a redes de subsistencia e intercambio de recursos de corto alcance, esenciales para mantener la cohesión en determinadas áreas. En conjunto, estos patrones sugieren un equilibrio entre redes locales estratégicas y una conectividad más amplia a lo largo del territorio (Figura 5.22 y Tabla 5.1).

Inicio de la Edad del Hierro (EIA): Durante el EIA, la red exhibe una menor densidad en comparación con el LBA, posiblemente reflejando una fase de reorganización y adaptación ante un periodo de cambio. La densidad para k = 10 es de 0.0440, lo cual indica que, aunque el número de asentamientos interconectados se reduce respecto al periodo anterior, aquellos que permanecen conectados mantienen conexiones estables con varios vecinos cercanos. A medida que el valor de k disminuye (k = 1 o k = 2), tanto la densidad como el grado promedio también lo hacen notablemente. Estas conexiones más limitadas sugieren que los asentamientos dependían de interacciones de proximidad para asegurar la subsistencia y cohesión regional en un contexto probablemente menos centralizado. Esto podría deberse a que, durante este periodo, se produjo una transición hacia una red, donde las interacciones de corto alcance eran esenciales (Figura 5.23 y Tabla 5.1).

Periodo Arcaico (ARC): En el periodo Arcaico, el número de nodos es similar al del EIA, indicando estabilidad en el número de asentamientos conectados, aunque con una leve reorganización en las conexiones. Para k = 10, el grado promedio es alto (12.772), lo que sugiere que, a esta escala, los asentamientos mantenían una fuerte interconexión, posiblemente reflejando un incremento en la actividad y desarrollo de las rutas de comunicación e intercambio. Este nivel de cohesión podría estar relacionado con la expansión de contactos y la integración de Creta en redes más extensas. En contraste, al reducirse los

valores de *k*, la conectividad disminuye de manera similar a periodos previos, aunque las interacciones locales seguían siendo fundamentales. Esto apunta a que, aunque existía una extensa red de relaciones, los vínculos regionales continuaban desempeñando un papel estratégico en las conexiones entre asentamientos (Figura 5.24 y Tabla 5.1).

Periodo Clásico (CLA): El periodo Clásico evidencia una reorganización significativa en la conectividad entre asentamientos. La red generada con k = 10 mantiene un grado promedio elevado (12.644) y muestra una densidad considerablemente superior (0.0706) en comparación con etapas anteriores. Esto se refleja en una estructura altamente interconectada, posiblemente vinculada a una mayor centralización impulsada por el desarrollo de centros urbanos clave. Con valores más bajos de *k*, se observa una fragmentación similar a la registrada en otros periodos, donde las redes menos densas representan interacciones de carácter local (Figura 5.25 y Tabla 5.1).

Periodo Helenístico (HEL): Durante el periodo Helenístico, la red evidencia una reducción considerable en la cantidad de nodos conectados, posiblemente vinculada a una continuación en el proceso de centralización. Para k = 10, el grado promedio alcanza 13.134 y la densidad aumenta a 0.1275, lo cual indica que los asentamientos estaban fuertemente interconectados a escalas superiores. Incluso en valores menores de k (k = 1 o k = 2), las redes presentan una densidad notablemente alta, lo que sugiere que, a pesar de la disminución de nodos, las conexiones permanecían siendo significativas. Esto refuerza la idea de un sistema centralizado en torno a centros urbanos estratégicos durante este periodo (Figura 5.26 y Tabla 5.1).

Periodo Romano (ROM): En el periodo Romano se observa un incremento notable en el número de asentamientos conectados, lo cual podría reflejar la expansión y consolidación de las redes bajo la administración romana. Para *k* = 10, la red exhibe una elevada cantidad de enlaces y un grado promedio de 12.555, sugiriendo una estructura extensa y fuertemente interconectada, posiblemente facilitada por el desarrollo de infraestructuras de transporte. Sin embargo, con valores más bajos de *k* (*k* = 1 o *k* = 2), las redes presentan menor densidad, lo que podría deberse a que, aunque los centros urbanos principales estaban bien conectados, al incrementarse el número de asentamientos, la red tiende a una mayor fragmentación (Figura 5.27 y Tabla 5.1).

En términos generales, al aumentar el valor de *k*, se incrementa la conectividad, revelando un sistema más interconectado y expansivo a medida que las redes se hacen más densas durante los distintos periodos analizados. Las redes con *k* = 10 en periodos como el Clásico y el Helenístico exhiben un proceso claro de centralización y consolidación de determinados centros clave. En cambio, los niveles más bajos de *k* (1 y 2) subrayan la importancia de interacciones locales, esenciales para la subsistencia y cohesión regional, especialmente en periodos como el EIA, donde una posible reconfiguración en las dinámicas de interacción se sustentó en redes más cercanas. Estas conexiones podrían reflejar la importancia de contextos regionales más reducidos, donde las conexiones locales habrían sido esenciales para la subsistencia, el intercambio de recursos y la colaboración entre comunidades. En definitiva, estos patrones muestran que la evolución de las redes socioespaciales entre los asentamientos cretenses estuvo estrechamente vinculada a dinámicas de centralización, expansión de rutas comerciales y adaptación ante periodos de cambio.

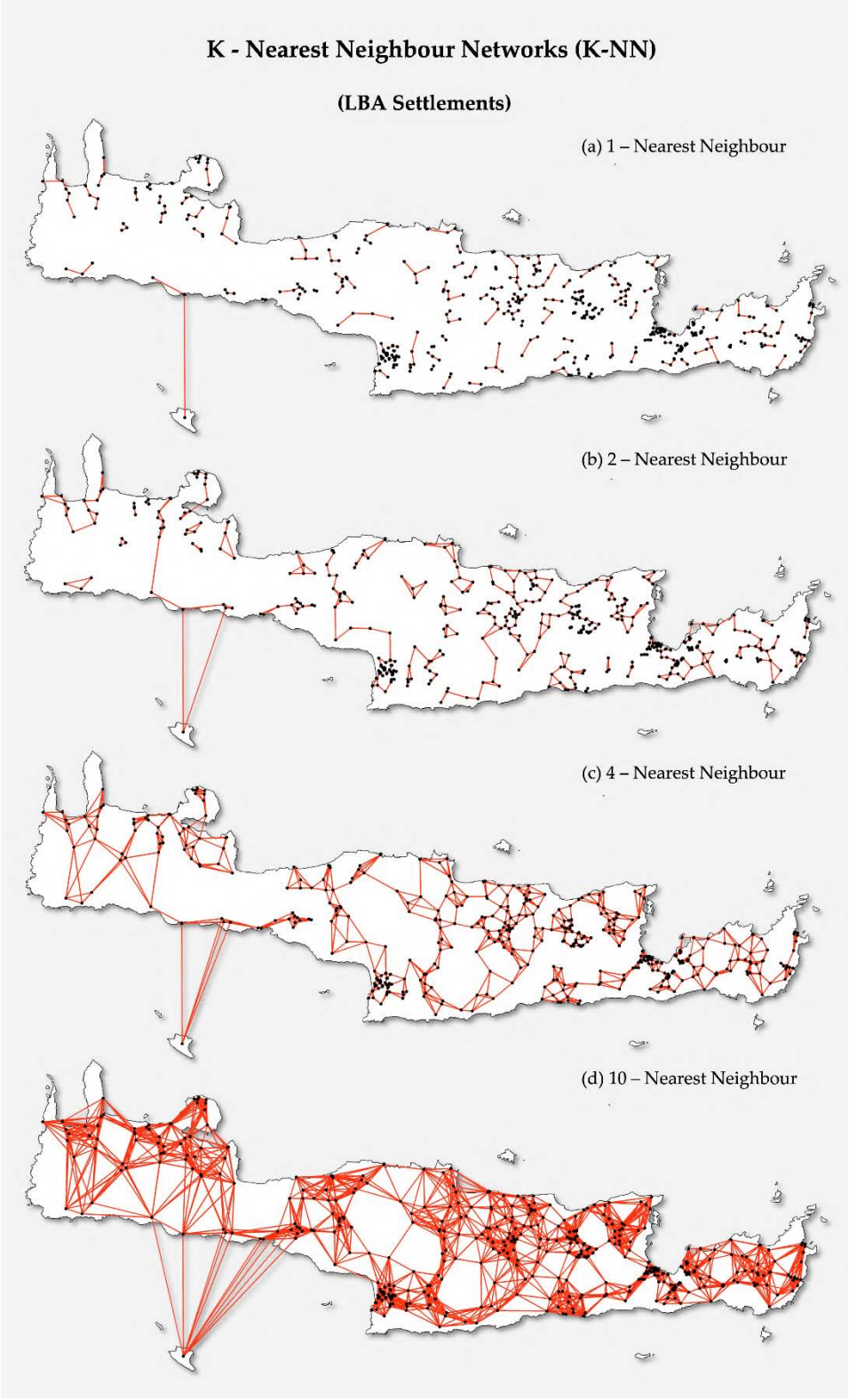


Figura 5.22. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del Bronce Final.

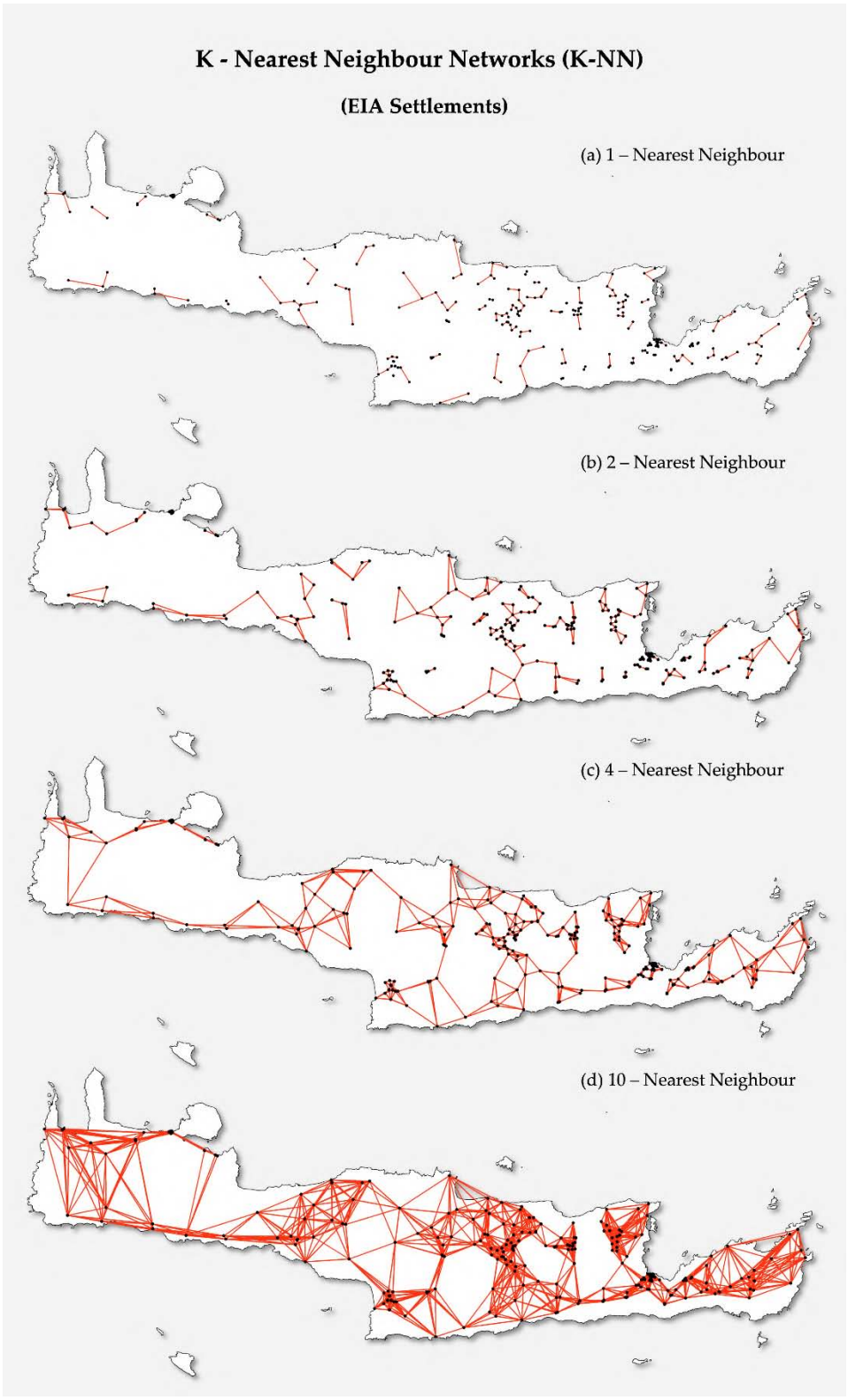


Figura 5.23. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del inicio de la Edad del Hierro.

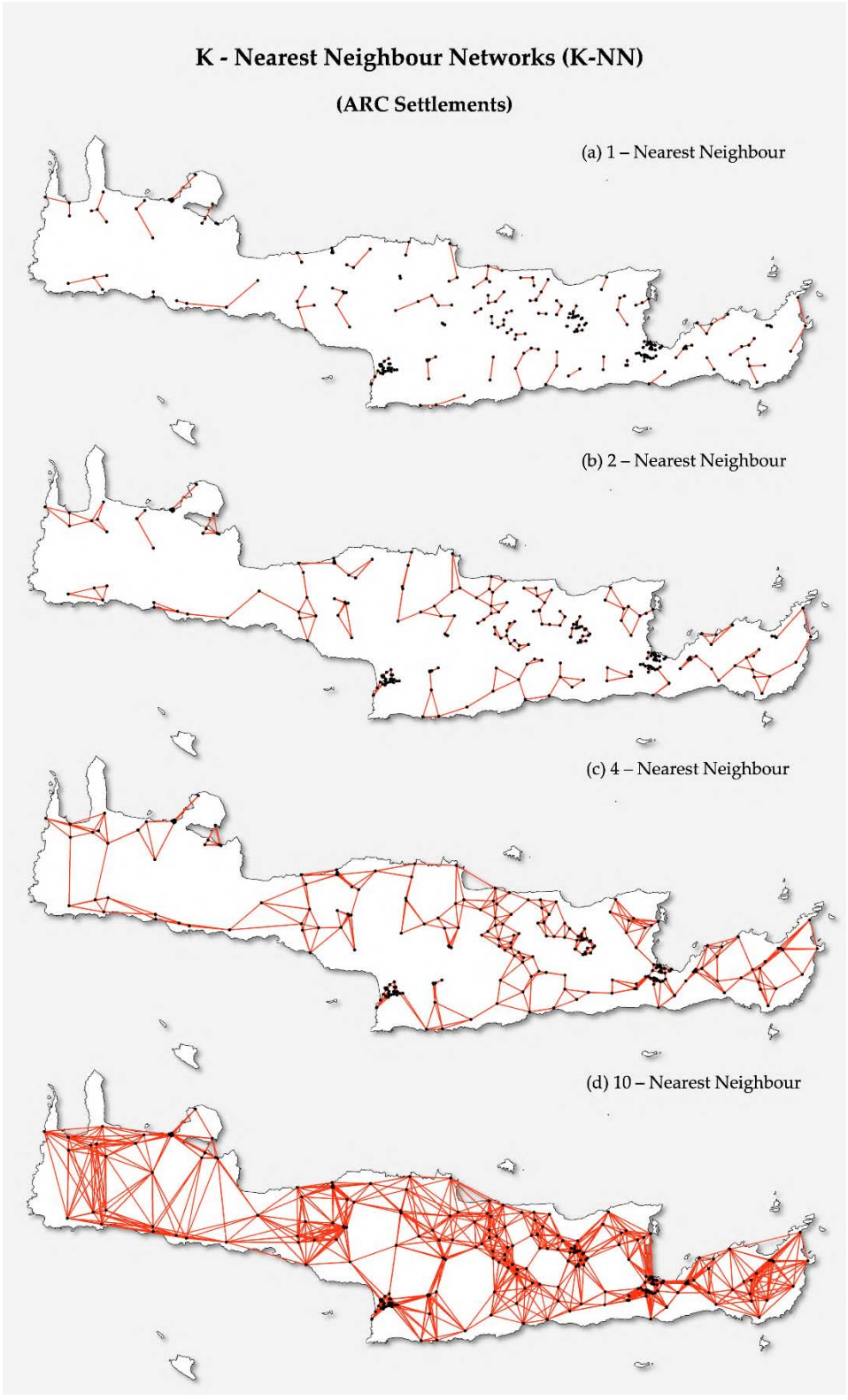


Figura 5.24. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del Periodo Arcaico.

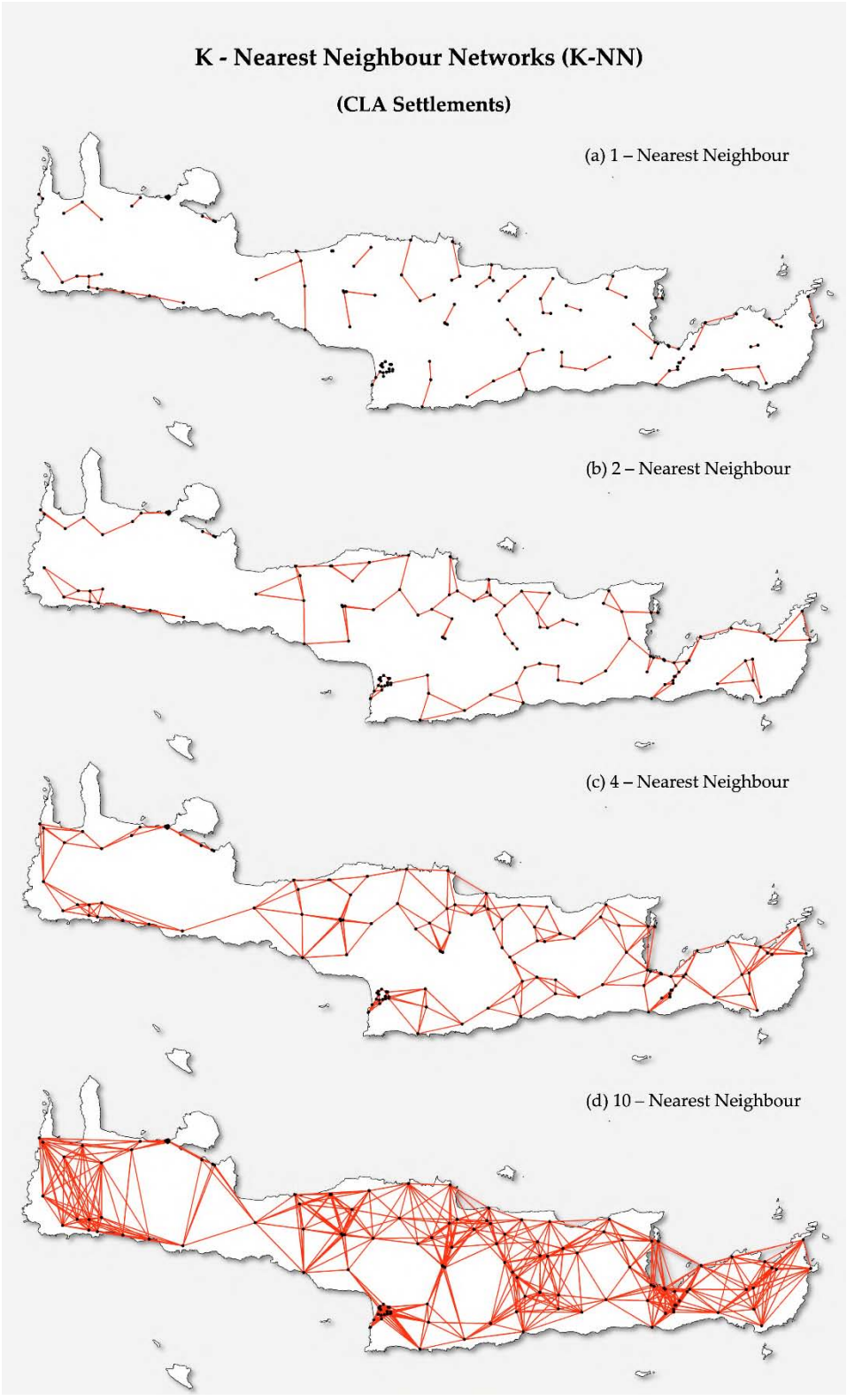


Figura 5.25. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del Periodo Clásico.

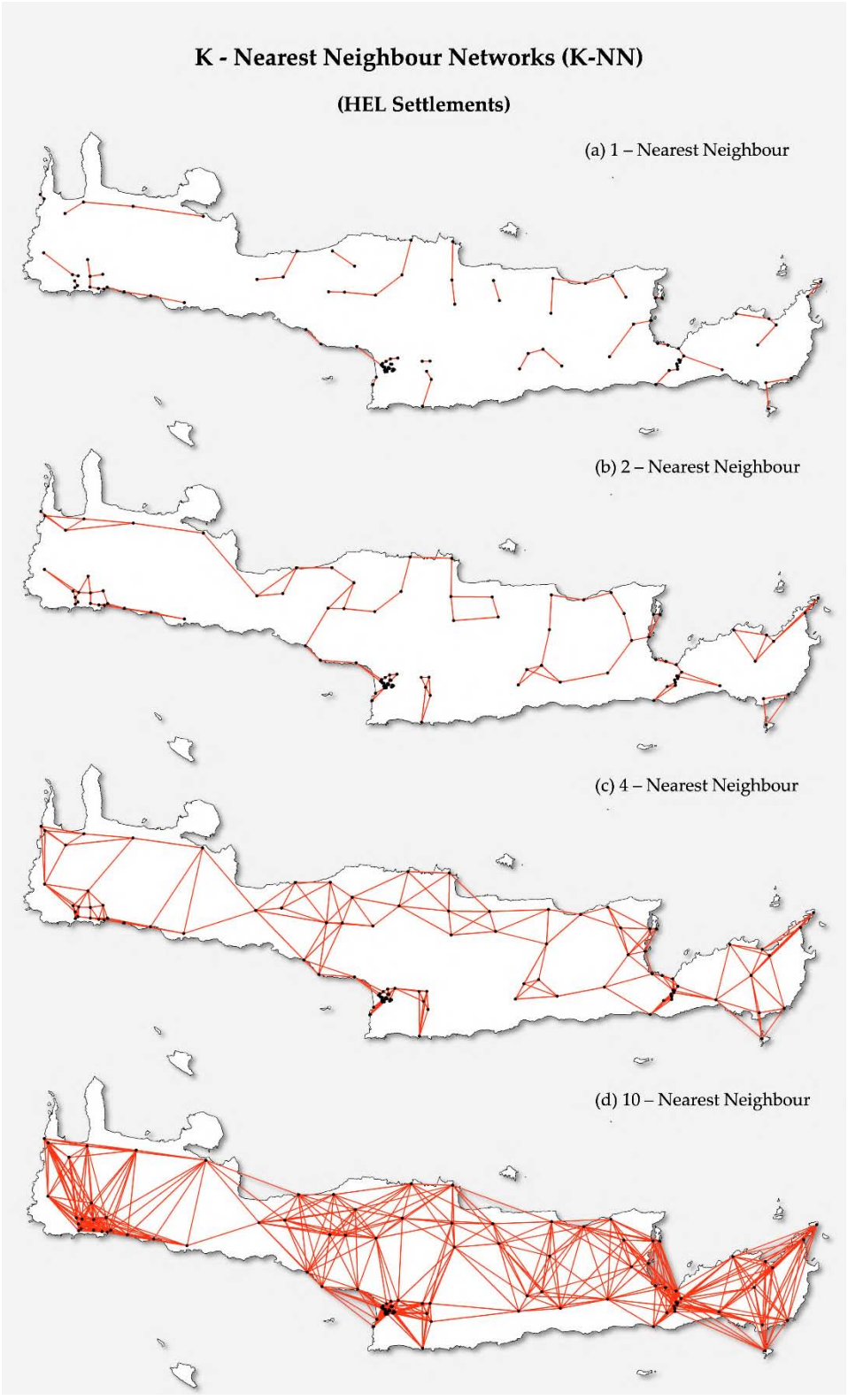


Figura 5.26. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del Periodo Helenístico.

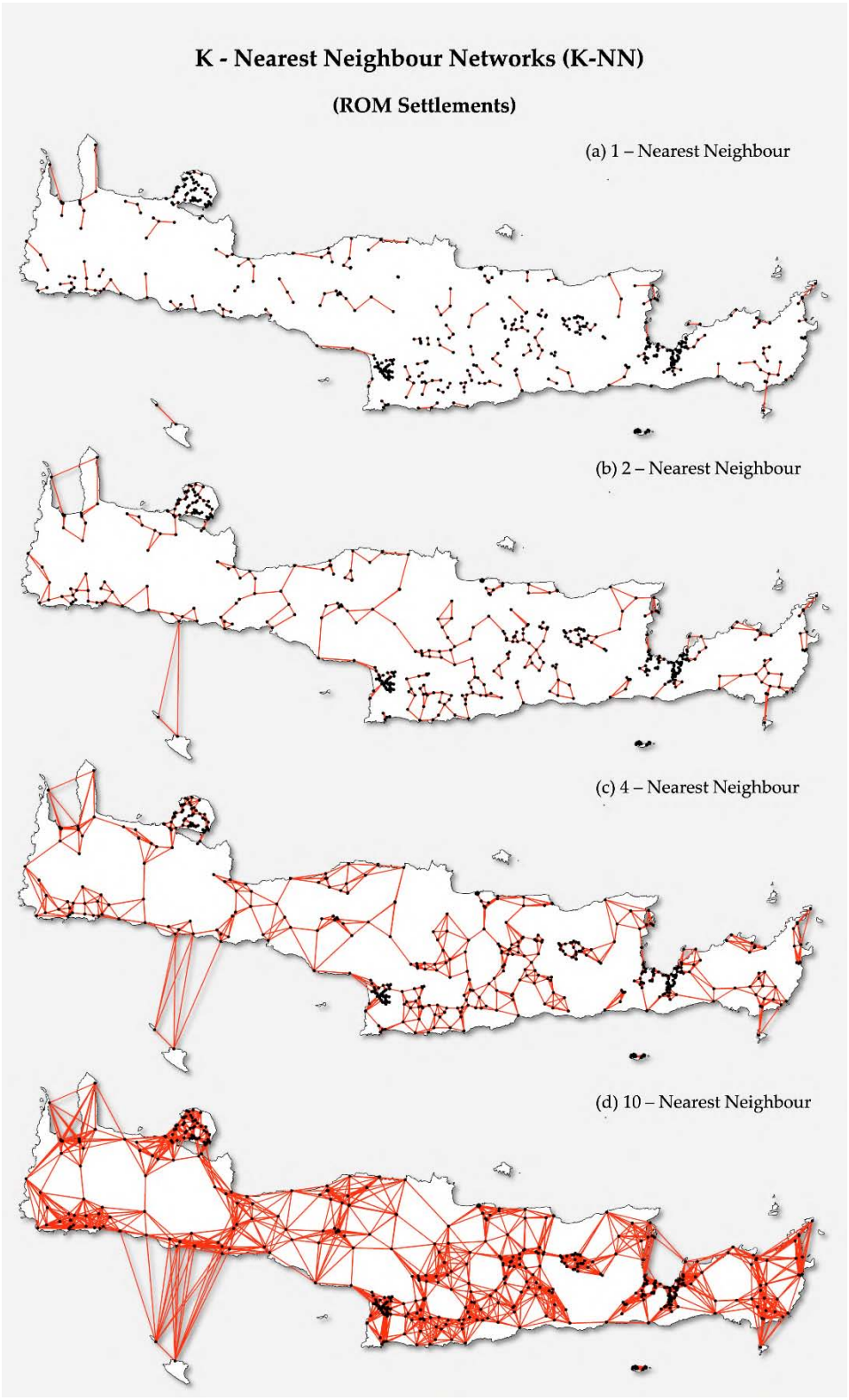


Figura 5.27. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del Periodo Romano.

Tabla 5.1. Resultados por periodo tras aplicar el modelo K-NN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad.

Temporalities	Nodes (Settlements)	K-NN Level	Edges	Average Degree	Density
LBA	459	10-NN	2915	12.701	0.0277
		4-NN	1184	5.159	0.0112
		2-NN	602	2.623	0.0057
		1-NN	326	1.420	0.0031
EIA	293	10-NN	1886	12.873	0.0440
		4-NN	756	5.160	0.0176
		2-NN	391	2.668	0.0091
		1-NN	206	1.406	0.0048
ARC	303	10-NN	1935	12.772	0.0422
		4-NN	778	5.135	0.0170
		2-NN	409	2.699	0.0089
		1-NN	216	1.425	0.0047
CLA	180	10-NN	1138	12.644	0.0706
		4-NN	460	5.111	0.0285
		2-NN	242	2.688	0.0150
		1-NN	129	1.433	0.0080
HEL	104	10-NN	683	13.134	0.1275
		4-NN	269	5.173	0.0502
		2-NN	138	2.653	0.0257
		1-NN	73	1.403	0.0136
ROM	515	10-NN	3233	12.555	0.0244
		4-NN	1320	5.126	0.0099
		2-NN	690	2.679	0.0052
		1-NN	365	1.417	0.0027

El segundo modelo aplicado y que complementa al anterior, se basa en el cálculo de redes de distancia máxima (*Maximum Distance Networks*, MDN). Este enfoque muestra patrones de red y distribuciones significativamente distintas en comparación con los modelos discutidos anteriormente (Figura 5.28 a 5.33 y Tabla 5.2). A diferencia del KNN, que conecta cada nodo con un número fijo de vecinos, el MDN conecta los asentamientos en función de diferentes umbrales de distancias máximas definidas previamente, las cuales varían según diferentes escalas —i.e., local, regional próxima, regional ampliada y máxima. Estas escalas permiten identificar diversos niveles de interacción espacial, desde relaciones locales hasta redes de mayor alcance, ofreciendo una visión detallada de cómo varía la conectividad y la estructura de la red en función de las escalas que las definen. Estas escalas incluyen:

1. **Escala local** (*Local Range*) (1 km ≤ distancia ≤ 10 km): Se refiere a las interacciones entre asentamientos cercanos dentro de un área geográfica limitada.
2. **Escala regional próxima** (*Inmediate Regional*) (10 km < distancia ≤ 50 km): Describe interacciones entre comunidades a distancias moderadas, pero aún dentro de la misma región geográfica, que permiten el comercio, la colaboración y una comunicación regular.
3. **Escala regional ampliada** (*Wider Regional*) (50 km < distancia ≤ 200 km): Abarca interacciones a través de distintas regiones geográficas, que requieren viajes a mayor distancia y a menudo implican intercambios económicos, políticos o culturales más complejos.
4. **Extensión máxima** (*Maximun Extent*) (≤ 260 km): Describe interacciones que abarcan toda la extensión de la isla de Creta, enlazan las zonas más distantes y sustentan relaciones comerciales, políticas y culturales a una escala mayor.

Como resultado, el análisis de las métricas obtenidas para las distintas escalas y periodos históricos evaluados revela una serie de determinadas variaciones en la naturaleza de las interacciones socioespaciales entre comunidades que se destacan a continuación:

Bronce Final (LBA): Durante el Bronce Final, la escala local revela una considerable cantidad de conexiones, con un grado promedio relativamente alto (3.447) y una densidad de 0.0075, lo que indica una fuerte conectividad entre asentamientos. En escalas regionales —tanto la inmediata como la ampliada— se observan patrones similares. En particular, en la escala regional ampliada, el número de conexiones y la densidad (0.0075) son comparables a los valores locales, lo que sugiere que las redes en este nivel eran tan activas y cohesionadas como las locales, indicando una integración sólida a estas escalas. En cambio, en la red de máxima distancia, el número de enlaces disminuye notablemente, con un grado promedio de solo 1.995 y una densidad de 0.0043. Esto podría relacionarse con redes periféricas o rutas de interacción de largo alcance, limitadas a ciertos asentamientos estratégicos esenciales para la comunicación e intercambio entre regiones distantes (Figura 5.28 y Tabla 5.2).

Inicio de la Edad del Hierro (EIA): Durante el EIA, la red a escala local muestra un grado promedio ligeramente inferior (3.337) al observado en el LBA, junto con una densidad de 0.0116, lo que indica una menor intensidad en términos de conectividad entre asentamientos, aunque la densidad permanece elevada. Al ampliar el análisis a la escala regional, se percibe un incremento en el número de enlaces y en la densidad de la red, particularmente en la escala regional ampliada (0.0124), lo que evidencia una expansión de las interacciones hacia un ámbito más amplio y favorece la

cohesión a nivel regional. Sin embargo, en la red de máxima distancia, las conexiones se limitan a los asentamientos más distantes y, aunque la densidad es considerable (0.0068), refleja que las relaciones de largo alcance eran menos frecuentes, sugiriendo que estas redes no eran tan extensas ni tan empleadas como en el LBA (Figura 5.29 y Tabla 5.2).

Periodo Arcaico (ARC): En el Periodo Arcaico, la red a escala local presenta una densidad de 0.0115 y un grado promedio de 3.442, valores comparables a los del LBA, lo que indica que los asentamientos mantienen interacciones significativas a nivel cercano, mostrando una estructura cohesionada. En la escala regional ampliada, se observa un incremento en el número de conexiones y en la densidad (0.0119), lo que sugiere que los asentamientos estaban bien integrados también en términos regionales. En contraste, la red de máxima distancia conserva patrones similares a los periodos anteriores, con un número reducido de conexiones (302) y un bajo grado promedio (1.993). Esto refleja que las rutas o vínculos de larga distancia seguían siendo limitados, restringidos a ciertos asentamientos clave que concentraban la mayoría de las interacciones en áreas locales o regionales (Figura 5.30 y Tabla 5.2).

Periodo Clásico (CLA): Durante el Periodo Clásico, se observa una notable reducción en el número de nodos conectados (asentamientos) (170 en la escala local), lo que podría indicar un proceso de consolidación de asentamientos. Las redes locales muestran una elevada densidad (0.0180), lo cual sugiere que, a pesar de la disminución en nodos, las conexiones cercanas permanecen siendo significativas. A medida que se amplía la escala, las redes regionales (inmediata y ampliada) incrementan su densidad, alcanzando 0.0196 en la escala regional ampliada, el valor más alto de todos los periodos. Esto indica

que, en este periodo, los asentamientos mantenían interacciones más amplias y estaban mejor integrados regionalmente que en etapas anteriores, probablemente debido a la consolidación y crecimiento de ciertos centros urbanos o a la expansión de redes clave. En la red de máxima distancia, aunque el número de conexiones es relativamente bajo, la densidad (0.0111) supera la de los periodos previos, lo que sugiere una mayor cohesión y expansión en las conexiones de larga distancia en esta fase (Figura 5.31 y Tabla 5.2).

Periodo Helenístico (HEL): En el Periodo Helenístico, la red muestra un menor número de nodos conectados (asentamientos) (92 en la escala local), pero tanto la densidad (0.0301) como el grado promedio (2.739) alcanzan los valores más altos registrados en comparación con periodos anteriores, lo cual indica una fuerte interconexión de los asentamientos a nivel local. En las escalas regionales (inmediata y ampliada), las redes conservan una alta densidad (0.0317 y 0.0324, respectivamente), lo que sugiere una integración significativa y mayor cohesión regional entre los asentamientos, posiblemente asociada a una mayor centralización. En la red de máxima distancia, aunque el grado promedio permanece bajo (1.980), la densidad (0.0192) es considerablemente alta en comparación con los periodos previos. Esto podría reflejar un desarrollo más avanzado de las conexiones de larga distancia, posiblemente indicando una expansión territorial significativa durante este periodo (Figura 5.32 y Tabla 5.2).

Periodo Romano (ROM): Durante el Periodo Romano, se observa un aumento significativo en el número de asentamientos y conexiones en todas las escalas. La red local presenta un grado promedio de 3.675 y una densidad de 0.0071, lo cual sugiere una alta interacción entre asentamientos en este

nivel, probablemente como resultado de la expansión y reconfiguración de la isla bajo la administración romana. Las redes regionales también muestran densidades considerables (0.0063 en la escala inmediata y 0.0067 en la ampliada), indicando que las interacciones trascendían el ámbito local y se extendían a nivel regional, integrando la isla en una estructura más amplia. Sin embargo, en la red de máxima distancia, la densidad es notablemente baja (0.0038), lo que sugiere que la expansión de asentamientos pudo haber generado cierta fragmentación en las redes, o bien que las conexiones a larga distancia permanecían limitadas a ciertos centros urbanos o rutas estratégicas (Figura 5.33 y Tabla 5.2).

En términos generales, las redes de alcance local y regional muestran altos grados promedio y densidades en los distintos periodos analizados, lo cual evidencia que las interacciones entre asentamientos eran más intensas a estas escalas. En contraste, las redes a una escala mayor (máxima distancia) presenta consistentemente un grado promedio más bajo y menores densidades, lo que sugiere que las conexiones de largo alcance pudieron estar restringidas a ciertos asentamientos clave o rutas estratégicas. Este incremento significativo en la densidad y en la cantidad de conexiones en los niveles local y regional, especialmente en los periodos Clásico y Helenístico, podría estar asociado a procesos de centralización y consolidación. Por otro lado, en el Periodo Romano, se observa una expansión significativa en el número de asentamientos y conexiones en todas las escalas, reflejando la integración de Creta en una red más amplia, probablemente como resultado de una conexión más extensa de la isla con otros territorios. Así, las distintas configuraciones y estructuras de las redes identificadas revelan cómo estas comunidades adaptaron sus relaciones y conexiones en respuesta a las necesidades y oportunidades específicas de cada periodo.

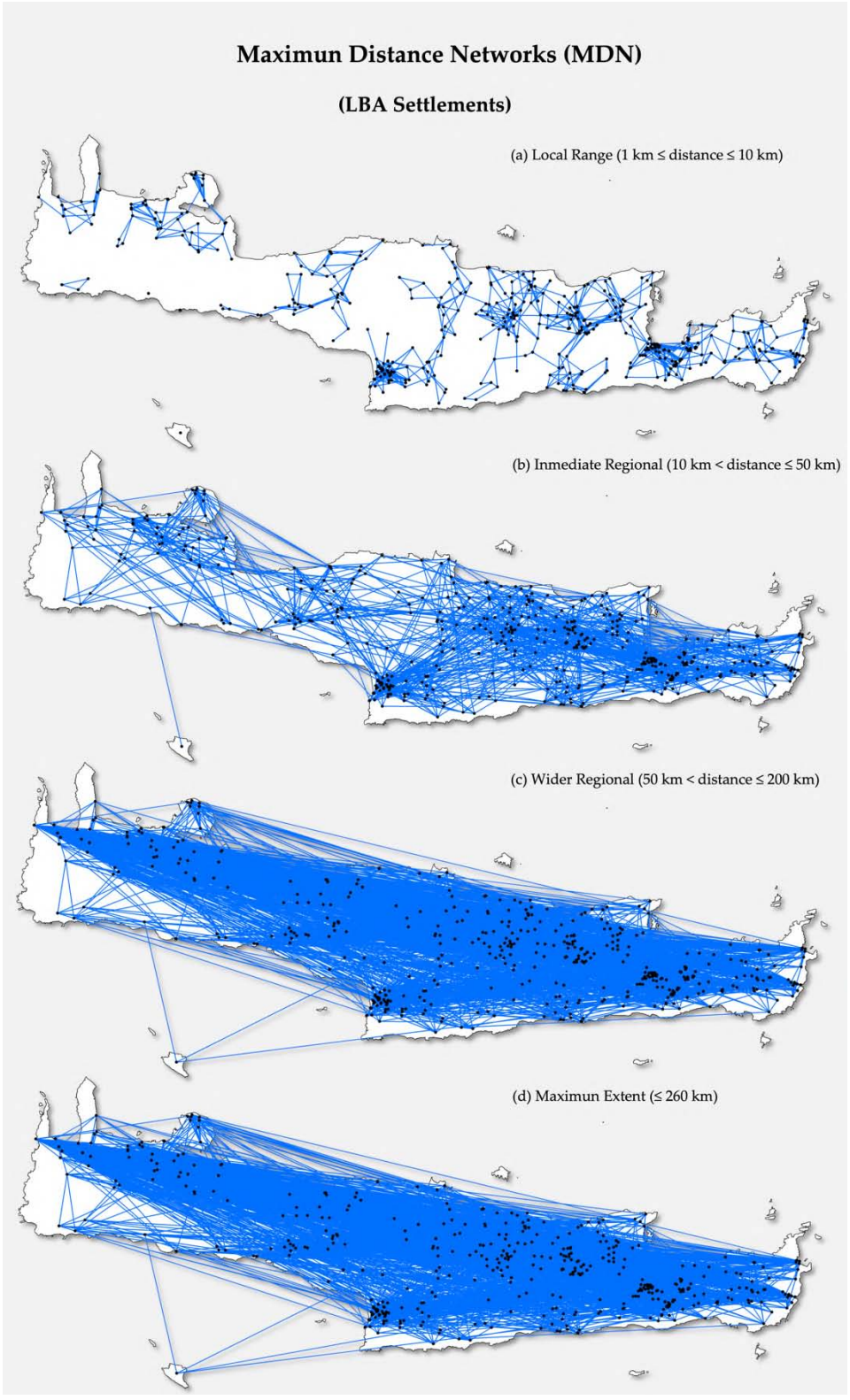


Figura 5.28. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del Bronce Final.

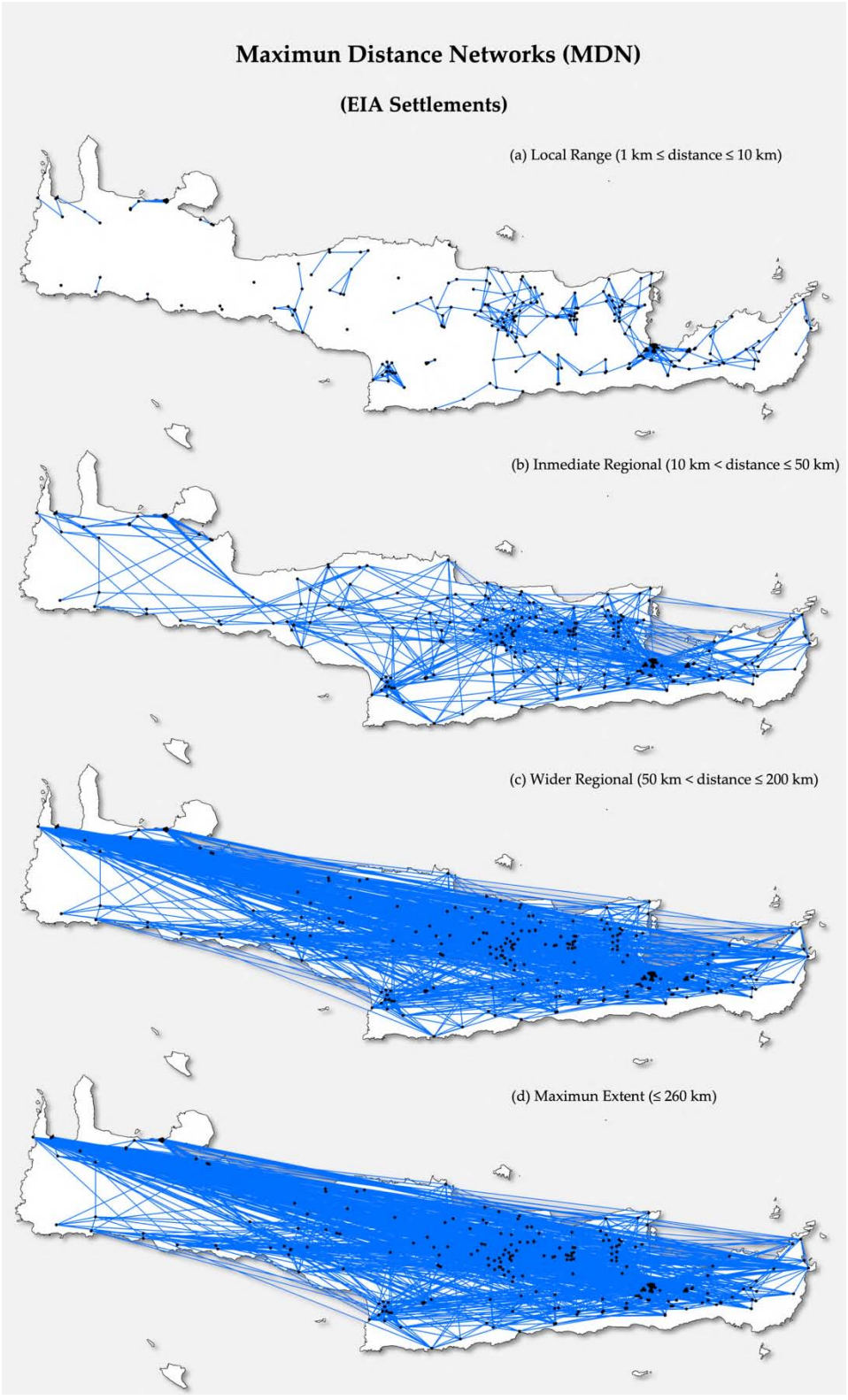


Figura 5.29. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del inicio de la Edad del Hierro.

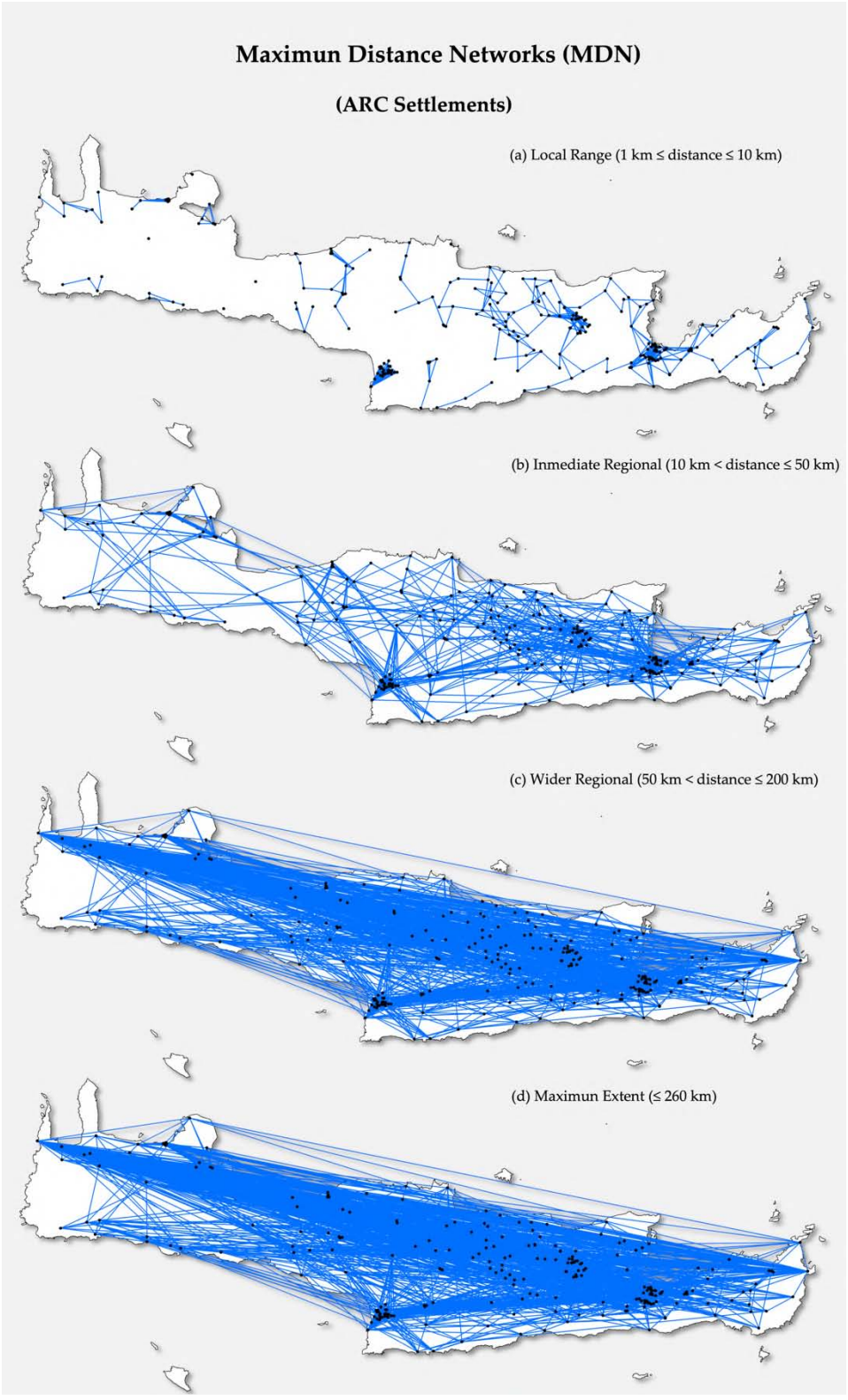


Figura 5.30. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del Periodo Arcaico.

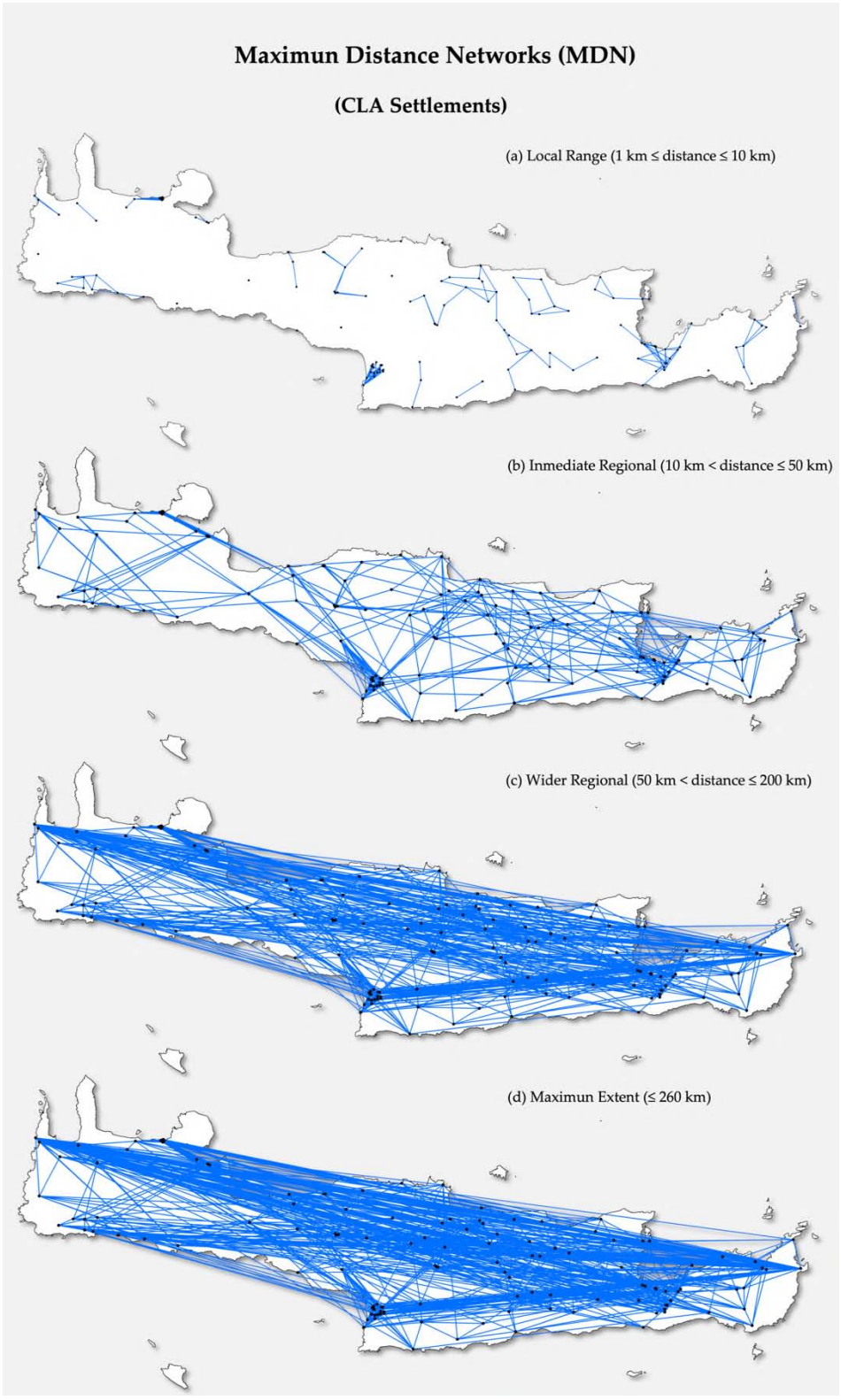


Figura 5.31. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del Periodo Clásico.

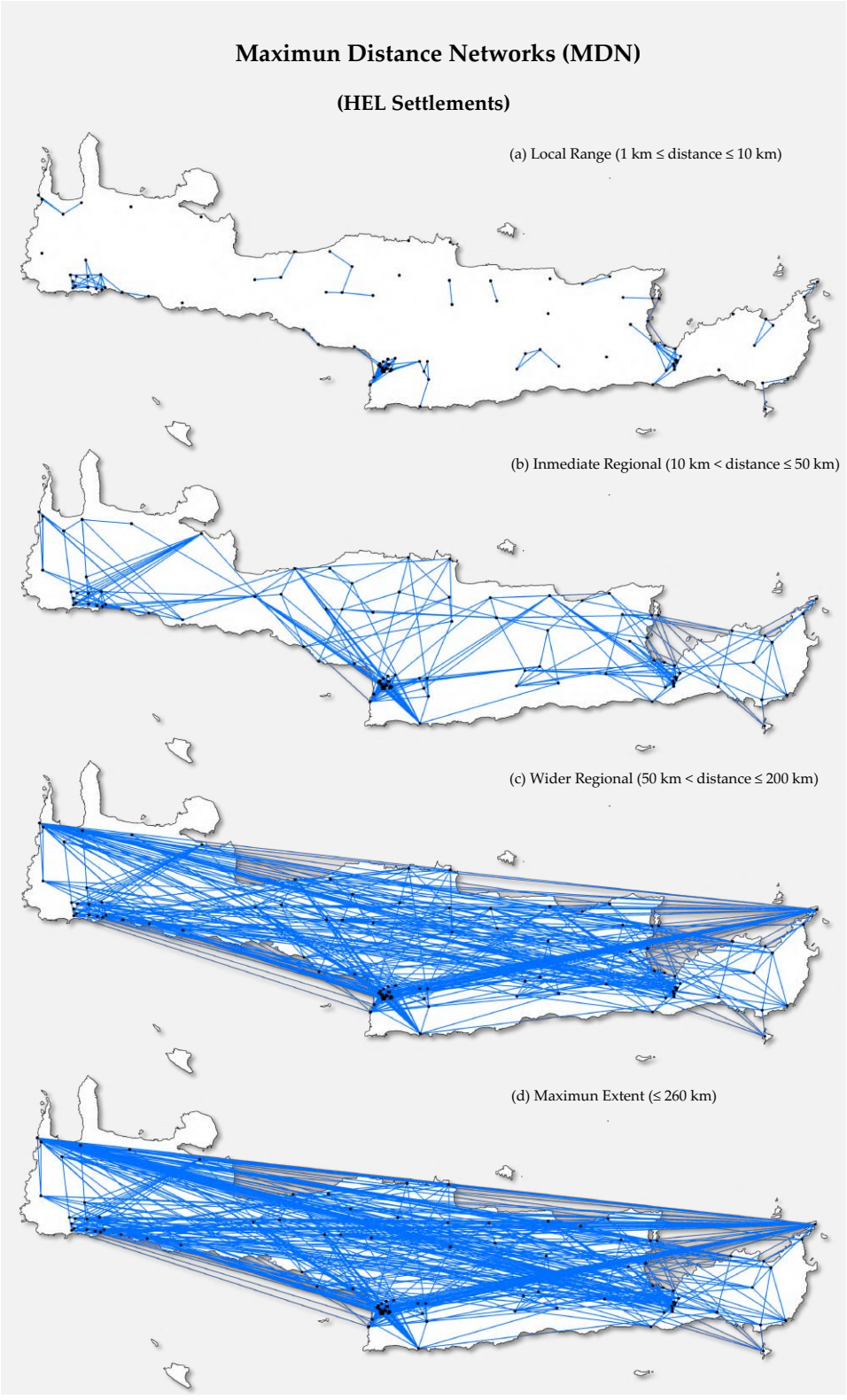


Figura 5.32. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del Periodo Helenístico.

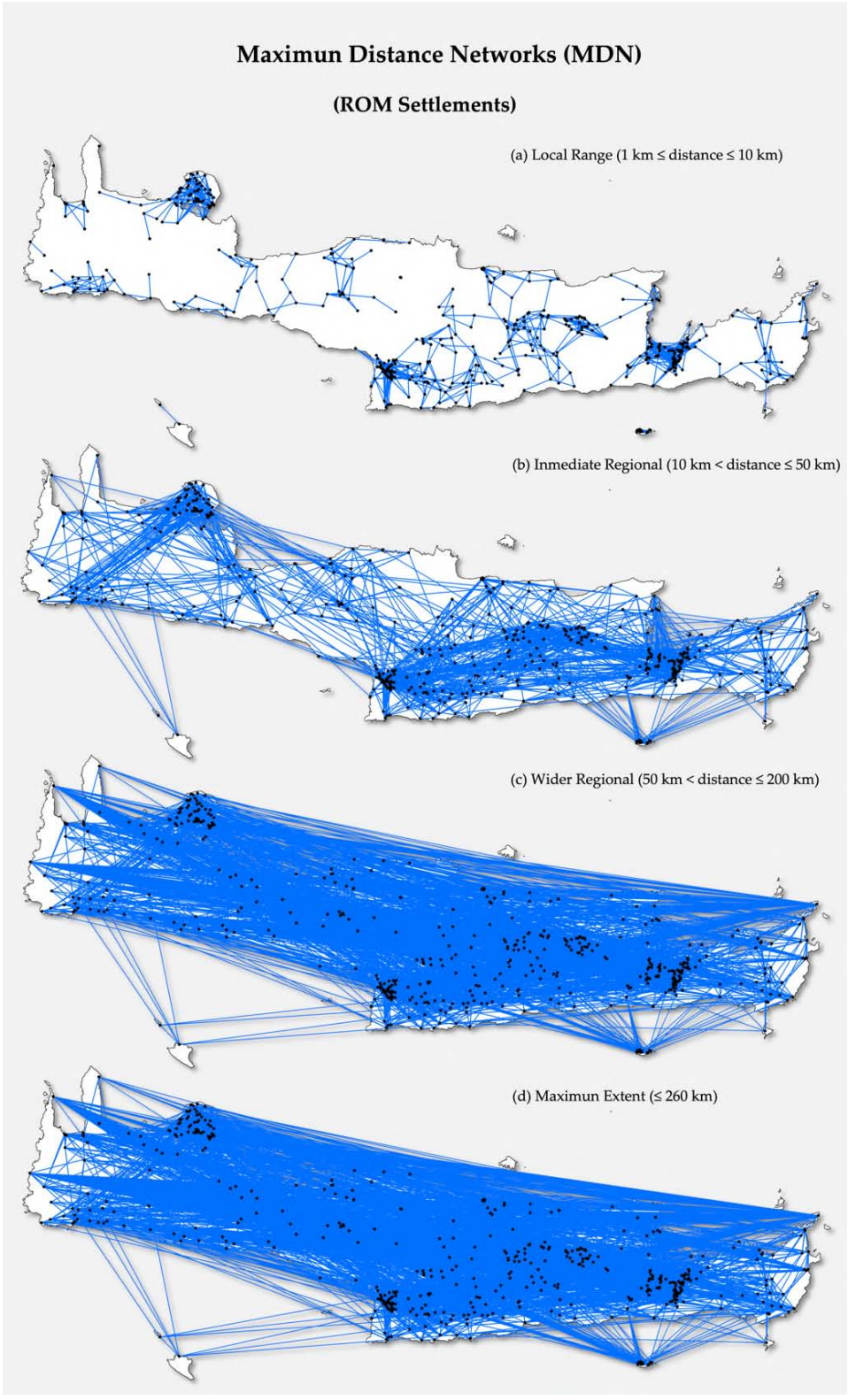


Figura 5.33. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del Periodo Romano.

Tabla 5.2. Resultados por periodo tras aplicar el modelo MDN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad

Temporalities	MDN Scale	Nodes (Settlements)	Edges	Average Degree	Density
LBA	Local	456	786	3.447	0.0075
	Regional (Inmediate)	459	717	3.124	0.0068
	Regional (Wider)	459	797	3.472	0.0075
	Maximun	459	458	1.995	0.0043
EIA	Local	287	479	3.337	0.0116
	Regional (Inmediate)	293	484	3.303	0.0113
	Regional (Wider)	293	531	3.624	0.0124
	Maximun	293	292	1.993	0.0068
ARC	Local	298	513	3.442	0.0115
	Regional (Inmediate)	303	509	3.359	0.0111
	Regional (Wider)	303	547	3.610	0.0119
	Maximun	303	302	1.993	0.0066
CLA	Local	170	259	3.047	0.0180
	Regional (Inmediate)	180	307	3.411	0.0190
	Regional (Wider)	180	316	3.511	0.0196
	Maximun	180	179	1.988	0.0111
HEL	Local	92	126	2.739	0.0301
	Regional (Inmediate)	104	170	3.269	0.0317
	Regional (Wider)	104	174	3.346	0.0324
	Maximun	104	103	1.980	0.0192
ROM	Local	512	941	3.675	0.0071
	Regional (Inmediate)	515	836	3.246	0.0063
	Regional (Wider)	515	899	3.491	0.0067
	Maximun	515	514	1.996	0.0038

Estos análisis basados en modelos de vecinos más cercanos (K-NN) y redes de distancia máxima (MDN), proporcionan una visión más amplia y matizada de las dinámicas de interacción entre los asentamientos a distintos niveles y escalas. Sin embargo, ambas aproximaciones presentan la limitación de basar las conexiones entre entidades solo en la distancia euclidiana —i.e., la distancia directa entre asentamientos—, lo que puede ser demasiado restrictivo. Para superar esta limitación, se han empleado una serie de modelos adicionales con enfoques más flexibles, los cuales no solo complementan y validan los resultados previos, sino que también ofrecen una visión más detallada de cómo se estructuran estas redes de interacción.

Por lo tanto, se presentan una serie de modelos alternativos, los cuales se basan en el análisis de regiones de influencia determinados mediante distancia cuadrática —i.e., ajustando las conexiones entre asentamientos en función de los patrones de localización y distribución espacial mostrados por estos elementos, así como a las condiciones compartidas que determinan su conectividad—. Esto ha proporcionado una mayor flexibilidad para examinar los procesos de interacción entre asentamientos a distintas escalas y a lo largo de los distintos periodos, captando con mayor precisión la complejidad inherente a estos procesos.

En primer lugar, se evalúan los resultados obtenidos a partir de modelos de redes de vecindad relativa (*Relative Neighborhood Networks*, RNN). En estas redes, dos nodos (asentamientos) se conectan solo si no existe un tercer nodo más cercano a ambos que la distancia que los separa, lo que permite modelar relaciones espaciales clave sin generar un exceso de conexiones, capturando únicamente los vínculos esenciales. De esta manera, este enfoque obvia conexiones redundantes y facilita la identificación de las interacciones más

significativas entre asentamientos que comparten zonas de influencia relativamente cercanas. Como parte del análisis, también se examinan indicadores clave como el número de nodos conectados, el número de enlaces, el grado promedio y la densidad de la red, observando el comportamiento de estas métricas en cada escala y periodo. Esto ha facilitado examinar con mayor precisión los patrones de interacción y cómo han evolucionado a lo largo del tiempo, ofreciendo una visión detallada de las dinámicas socioespaciales entre asentamientos y su conectividad.

Bronce Final (LBA): Durante el Bronce Final, la red resultante muestra una estructura relativamente dispersa, con un número limitado de enlaces en comparación con el total de asentamientos. La presencia de 460 nodos (asentamientos) conectados mediante 535 enlaces refleja que, a pesar de una alta conectividad, los asentamientos no están integrados en una red altamente cohesiva. El grado promedio de 2.326 indica que cada asentamiento se conecta con solo dos o tres vecinos cercanos. La densidad de 0.0050 evidencia que las interacciones se restringen a vínculos inmediatos y esenciales, posiblemente debido a relaciones localizadas con rutas comerciales o de interacción limitadas a puntos específicos clave (Figura 5.34 y Tabla 5.3).

Inicio de la Edad del Hierro (EIA): Durante este periodo, la cantidad de asentamientos conectados disminuye a 294, lo cual podría indicar una contracción o proceso de reorganización influido por una etapa de cambio. Las conexiones también se reducen a 336, con un grado promedio de 2.285, ligeramente inferior al registrado en el LBA. No obstante, la densidad de la red aumenta a 0.0078, lo que sugiere que, a pesar de la reducción en el número de asentamientos, estos permanecen significativamente interconectados. Este incremento en la densidad podría estar vinculado a una mayor cohesión entre

las conexiones locales de las comunidades, reflejando una reorganización territorial orientada a facilitar la comunicación e interacción, con asentamientos que se agrupan estratégicamente para optimizar la eficiencia de la red (Figura 5.34 y Tabla 5.3).

Periodo Arcaico (ARC): En el Periodo Arcaico, la cantidad de asentamientos conectados experimenta un ligero incremento, alcanzando los 303 en comparación con el EIA, mientras que el número de conexiones (345) y el grado promedio (2.277) se mantienen estables, evidenciando continuidad en las relaciones de proximidad. En cambio, la densidad de la red disminuye levemente, situándose en 0.0075. Este leve descenso, podría estar relacionado al crecimiento en el número de asentamientos conectados y, por tanto, una mayor fragmentación en la red. Además, la menor densidad también sugiere un cambio en la organización y estructuración espacial, con una distribución más dispersa entre asentamientos que se expanden hacia áreas más periféricas (Figura 5.34 y Tabla 5.3).

Periodo Clásico (CLA): Durante el Periodo Clásico, el número de asentamientos disminuye drásticamente a 180, y las conexiones se reducen a 203. Aunque el grado promedio (2.255) se mantiene constante, la densidad de la red aumenta considerablemente, alcanzando 0.0126. Este patrón indica una consolidación notable, en la cual, pese a la reducción en el número de asentamientos, estos presentan una interconexión más fuerte. La mayor densidad podría estar relacionada con la formación y fortalecimiento de centros urbanos, impulsada por una cohesión política, social o económica que convierte a determinados asentamientos en núcleos estratégicos. Este cambio hacia una estructura más centralizada sugiere que las interacciones, aunque

con un menor número de nodos, eran más intensas y estructuradas (Figura 5.35 y Tabla 5.3).

Periodo Helenístico (HEL): Durante el Periodo Helenístico, el número de asentamientos conectados se reduce aún más (104), con solo 116 enlaces. Sin embargo, la densidad de la red alcanza su valor máximo, 0.0216, lo que indica una conectividad significativamente más intensa entre asentamientos. Esta elevada densidad sugiere una fuerte interdependencia, posiblemente reflejo de un control territorial más centralizado o de redes muy activas entre los principales centros urbanos. Esta concentración habría fortalecido las interacciones, creando una estructura que facilitaba la cooperación y el intercambio entre las zonas conectadas. Esto refuerza la hipótesis de una mayor centralización y una actividad socioeconómica intensa en centros estratégicos, lo que potenció la cohesión y la conectividad regional durante este periodo (Figura 5.35 y Tabla 5.3).

Periodo Romano (ROM): Durante el Periodo Romano, se observa un aumento significativo en el número de asentamientos conectados, alcanzando un total de 515. Las conexiones suman 587 y, aunque el grado promedio permanece estable en comparación con otros periodos, la densidad de la red es la más baja de todos los intervalos analizados, con un valor de 0.0044. Este patrón podría estar relacionado con una notable expansión de las redes. De hecho, la baja densidad indica que, al estar los asentamientos más dispersos geográficamente, se produce una mayor dispersión. Esta disposición favorece una ocupación extensa sin una red de interacciones altamente centralizada (Figura 5.35 y Tabla 5.3).

En términos generales, las redes analizadas mediante el modelo de RNN muestran una notable estabilidad en el grado promedio a lo largo de los distintos periodos históricos evaluados, manteniéndose alrededor de 2.2 - 2.3. Esto sugiere una estructura territorial caracterizada por la prevalencia de conexiones locales y de proximidad, reflejando un patrón recurrente en la organización socioespacial de la isla. No obstante, la densidad de las redes varía significativamente entre periodos, lo que revela procesos de centralización y segregación que podrían estar asociados a fases de cambio y reorganización territorial. Por ejemplo, el incremento de densidad en los periodos Clásico y Helenístico sugiere una mayor cohesión y centralización, posiblemente vinculada a la consolidación de centros urbanos estratégicos que canalizaban las interacciones.

Estas fluctuaciones en el número de nodos conectados y en la densidad de las conexiones parecen indicar cómo las redes se ajustaban dinámicamente a distintos procesos y condiciones contextuales. Así, en periodos como el inicio de la Edad del Hierro (EIA), el aumento de la densidad, pese a la reducción en la cantidad de nodos, podría implicar un reagrupamiento estratégico para optimizar el acceso a recursos y fomentar la cooperación entre asentamientos. En contraste, la baja densidad combinada con un elevado número de nodos (asentamientos) conectados durante el periodo Romano sugiere una expansión territorial significativa que generó una red más dispersa. Además, la persistencia en la conectividad local, a pesar de estas variaciones, subraya la importancia de mantener una estructura cohesionada entre grupos de asentamientos cercanos, lo cual favorecía un modelo de red adaptado tanto a las características geográficas de la isla como a las dinámicas socioeconómicas y de organización territorial presentes en cada contexto histórico.

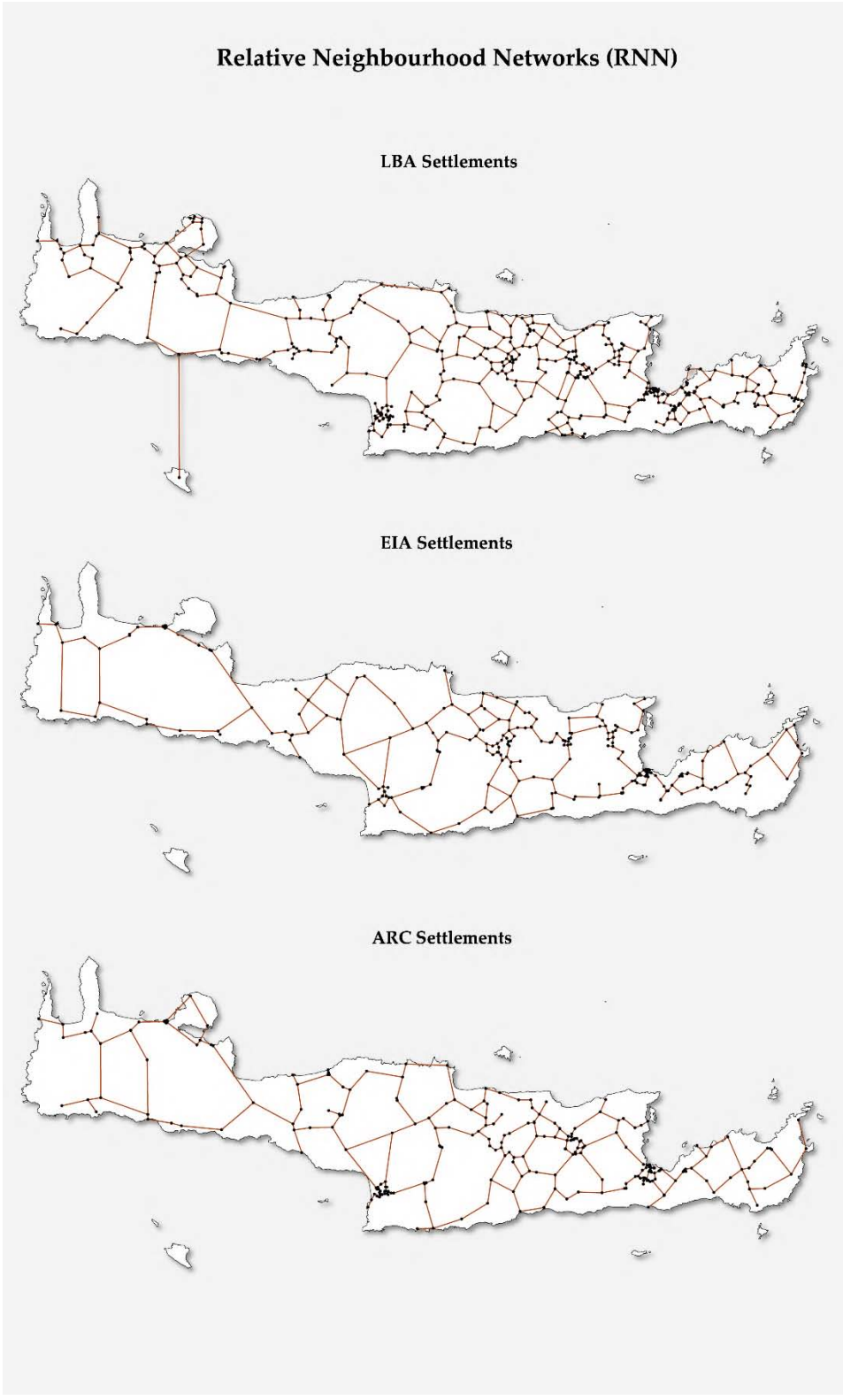


Figura 5.34. Modelo de red RNN para el Bronce Final, inicio de la Edad del Hierro y Arcaico.

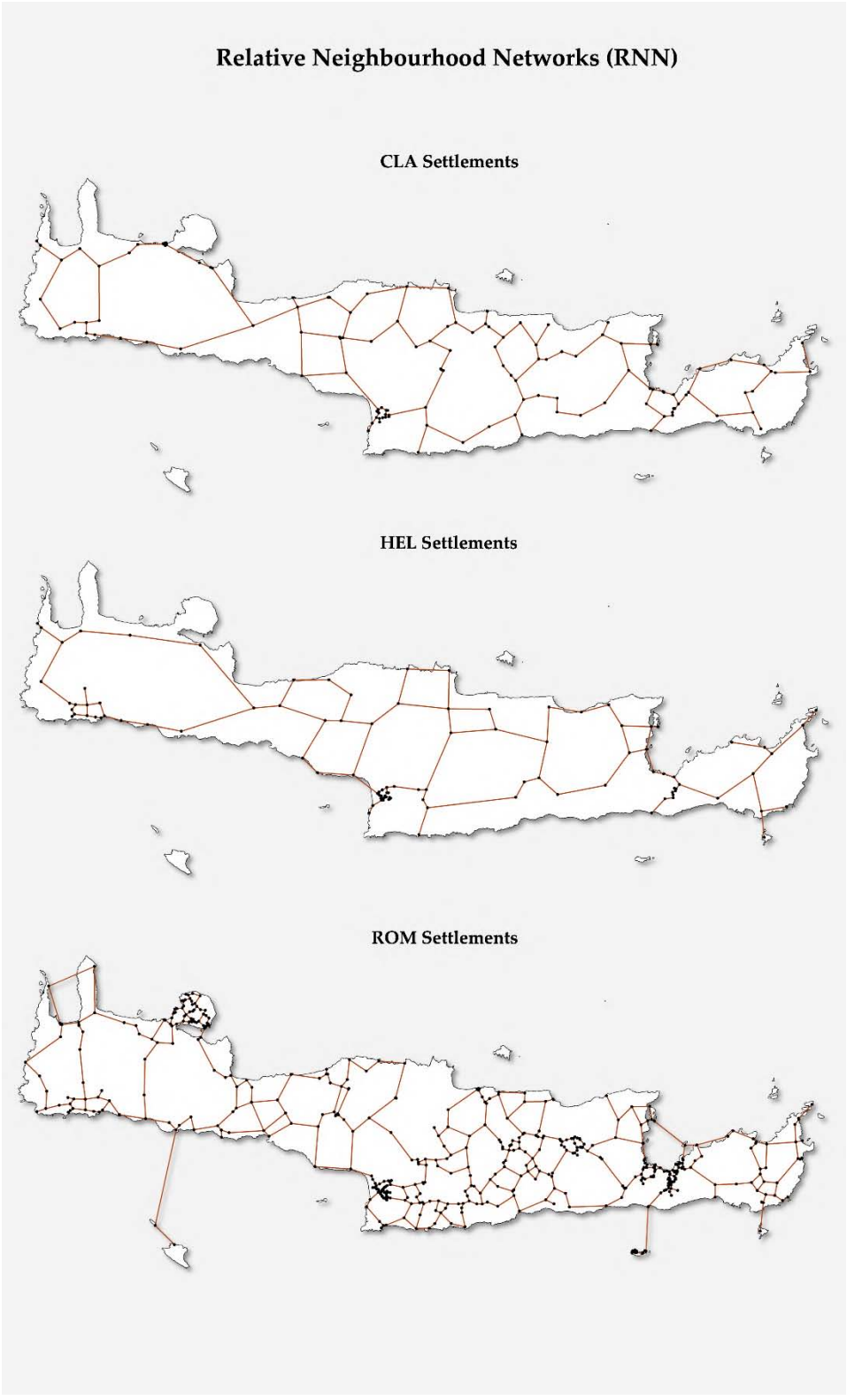


Figura 5.35. Modelo de red RNN para el periodo Clásico, Helenístico y Romano.

Tabla 5.3. Resultados por periodo tras aplicar el modelo RNN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad.

Temporalities	Nodes (Settlements)	Edges	Average Degree	Density
LBA	460	535	2.326	0.0050
EIA	294	336	2.285	0.0078
ARC	303	345	2.277	0.0075
CLA	180	203	2.255	0.0126
HEL	104	116	2.230	0.0216
ROM	515	587	2.279	0.0044

Por último, se presentan los resultados obtenidos mediante la aplicación de los modelos de redes *Gabriel Graphs* (GG) y *β-Skeletons*. Estos modelos muestran cómo se conectan los asentamientos en función de sus regiones de influencia, determinadas por distintos umbrales de β ($\beta = 1, 1.5, 2, 3$), los cuales controlan la extensión de dichas áreas. Cuando β es igual a 1, dos nodos están conectados si no hay otros nodos dentro de la región de influencia cuyo diámetro es igual a la distancia entre ellos, lo que corresponde a un escenario de *Gabriel Graph* (GG). A medida que el valor de β aumenta, las áreas de influencia se expanden, permitiendo más conexiones y generando una representación más amplia y dinámica de las relaciones espaciales entre los asentamientos.

Este análisis también incluye la evaluación de métricas clave, como el número de nodos (asentamientos), enlaces (conexiones entre asentamientos), grado promedio (número medio de conexiones por asentamiento) y densidad (conectividad global de la red). Estas métricas han permitido evaluar la estructura de las interacciones espaciales entre los asentamientos, proporcionando una comprensión más detallada de los patrones de interacción a diferentes escalas espaciales, dependiendo de los valores de β empleados, y mostrando cómo evolucionaron a lo largo del tiempo.

Bronce Final (LBA): Durante el Bronce Final, con β = 1 (GG), la red exhibe interacciones mayormente locales, caracterizadas por un grado promedio moderado (3.381). Con β = 1.5, se observa una ligera disminución en el número de nodos conectados (454), lo que podría deberse a la posible posición periférica de algunos asentamientos que quedan más aislados ante cambios en la región de influencia. No obstante, generalmente a medida que β incrementa, las conexiones aumentan notablemente, especialmente con β = 3, donde el grado promedio alcanza 10.466. Esto sugiere que, al elevar el valor de β, los asentamientos presentan más vínculos potenciales, reflejando redes a escalas superiores. De este modo, con valores elevados de β, la red espacial incorpora conexiones más distantes, capturando interacciones a una escala geográfica más amplia y destacando la relevancia de ciertas rutas o enlaces clave (Figura 5.36 y Tabla 5.4).

Inicio de la Edad del Hierro (EIA): Durante este periodo, la red de asentamientos presenta una conectividad reducida en comparación con el LBA. Sin embargo, a medida que el valor de β se incrementa, las conexiones también aumentan de forma notable, reflejando un mayor grado promedio y densidad. La única excepción se observa en β = 1.5, donde el número de nodos

desciende a 288 en contraste con los 293 de $\beta = 1$ (GG), lo que podría indicar que ciertos asentamientos pierden su vinculación debido a su ubicación. En cambio, aunque el número de asentamientos conectados es menor respecto al LBA, las interacciones a escalas más reducidas se intensifican, lo cual podría estar asociado con procesos de reorganización que promovieron una mayor cohesión y conectividad entre asentamientos, sugiriendo la formación de redes más integradas a nivel local (Figura 5.37 y Tabla 5.4).

Periodo Arcaico (ARC): Durante el periodo Arcaico, se observa un incremento tanto en la densidad de la red como en el grado promedio conforme aumentan los valores de β. Este patrón sugiere una expansión de las interacciones entre asentamientos, posiblemente impulsada por un crecimiento demográfico o cambios organizativos característicos de este periodo. Aunque el número de nodos conectados es comparable al del EIA, la red presenta una densidad superior, lo que indica una mayor interconexión entre los asentamientos. Este aumento en la densidad con valores crecientes de β parece señalar un desarrollo de redes más amplias que vinculan diversos centros urbanos, lo cual sugiere mayor interdependencia entre ellos. Así, se fortalecen las redes de comunicación e intercambio, consolidando rutas estratégicas que probablemente habrían comenzado a formarse en periodos anteriores (Figura 5.38 y Tabla 5.4).

Periodo Clásico (CLA): Durante este periodo, se observa una reducción considerable en el número de asentamientos conectados; sin embargo, al igual que en periodos previos, la densidad de la red aumenta significativamente. Con $\beta = 3$, se alcanza un valor de densidad significativa (0.0608). En cambio, aunque el grado promedio es alto, la red, pese al incremento en densidad, parece extenderse a larga distancia sin generar necesariamente una

conectividad intensiva a nivel local en todos los nodos (asentamientos). Este patrón podría asociarse con la consolidación de ciertos centros urbanos estratégicos y una mayor interdependencia entre ellos, sugiriendo una posible centralización o un sistema de intercambio más activo canalizado a través de determinados asentamientos durante este periodo (Figura 5.39 y Tabla 5.4).

Periodo Helenístico (HEL): Durante el periodo Helenístico, el número de asentamientos continúa disminuyendo, pero, al igual que en la etapa anterior, la densidad de la red experimenta un notable crecimiento. Con el valor de β = 3, la red alcanza una densidad elevada (0.1058), lo que sugiere una intensa interacción entre asentamientos. Este nivel podría indicar no solo un proceso de centralización, sino también una intensificación de las conexiones, facilitada por un sistema de comunicación más estructurado que unía asentamientos clave. Además, al comparar la densidad con la de periodos previos se evidencia cómo la red se volvió considerablemente más cohesionada (Figura 5.40 y Tabla 5.4).

Periodo Romano (ROM): Durante el periodo Romano, se observa una notable expansión en el número de asentamientos, probablemente vinculada con la integración de Creta dentro de una estructura administrativa y económica más amplia. Con β = 1 (GG), la red presenta un grado promedio moderado (3.308), lo que sugiere una conectividad más dispersa a nivel local. Sin embargo, al aumentar el valor a β = 3, la densidad de la red se incrementa considerablemente (0.0196) y el grado promedio asciende a 10.097. Esto refleja una mayor interconexión entre los asentamientos, posiblemente facilitada por la infraestructura romana y el establecimiento de rutas, que promovieron una red de interacciones más amplia y eficiente en todo el territorio. Aun así, cabe señalar que, pese al incremento en el número de asentamientos, la densidad

permanece baja en comparación con otros periodos, lo cual sugiere una red más extendida pero también más dispersa (Figura 5.41 y Tabla 5.4).

En términos generales, la conectividad entre los asentamientos cretenses aumenta de manera significativa conforme se incrementa el valor de β. Este aumento sugiere que, al ampliar el radio de influencia, los asentamientos establecen vínculos más estrechos, reflejando cómo estos lugares pudieron mantener interrelaciones a lo largo del tiempo. Además, estas redes no solo representan desplazamientos físicos, sino también las dinámicas sociales y culturales que configuraron Creta como un espacio interconectado.

Es relevante señalar que, a lo largo de los periodos analizados más tempranos, como el Bronce Final (LBA), el inicio de la Edad del Hierro (EIA) y el Arcaico (ARC), se observa un patrón común en las redes, especialmente en los valores bajos de β, que indica que las interacciones a pequeña escala eran predominantes o que las redes a escalas mayores se limitaban a ciertos centros clave o determinadas rutas debido a factores específicos y características propias de la isla. En cambio, en periodos más tardíos, las redes tienden a hacerse más densas. Este fenómeno es especialmente notable en los periodos más recientes, como el Clásico (CLA) y el Helenístico (HEL), donde las redes manifiestan una tendencia hacia una creciente centralización, con un menor número de asentamientos concentrando la mayoría de las conexiones. Además, se observa un patrón de fragmentación y dispersión de las redes a medida que se integran nuevos asentamientos, especialmente evidente durante el periodo Romano (ROM). Este cambio sugiere una estructura asociada al desarrollo de centros urbanos y la consolidación de rutas comerciales más estructuradas y expansivas.

En definitiva, el análisis de las redes socioespaciales en Creta permite inferir que los asentamientos no operaban de forma aislada, sino que estaban integrados en un sistema complejo de interdependencia que operaba a múltiples escalas. Este sistema parece estar condicionado por una combinación de factores humanos y no humanos que influían en los canales de comunicación e intercambio en cada uno de los periodos analizados. De hecho, más allá de la propia configuración morfológica de la isla, se observa la influencia de factores socioeconómicos clave, particularmente en ciertos periodos, cuando la infraestructura y los procesos de centralización transforman las redes hacia configuraciones más cohesionadas y centralizadas hacia puntos estratégicos clave. Estos resultados sugieren que, a medida que las redes se desarrollaban, las rutas de transporte y las infraestructuras no solo facilitaban las conexiones entre asentamientos cretenses, sino que también extendían estos vínculos hacia otros territorios.

En conjunto, los resultados obtenidos han permitido identificar puntos de conexión estratégicos y evaluar la accesibilidad de áreas clave, proporcionando una visión detallada de los patrones de interacción derivados de la estructura de las redes. De este modo, estos análisis han facilitado no solo la comprensión de las conexiones entre los antiguos asentamientos en Creta, sino también cómo estas redes impactaron y fueron a su vez influenciadas por las transformaciones sociales, culturales y políticas que modelaron la isla a lo largo de su historia. La evolución de estas redes emerge, por tanto, como un indicador del desarrollo de las sociedades que habitaron estos paisajes, evidenciando cómo sus estructuras organizativas se adaptaron en respuesta a las necesidades, cambios y presiones de cada periodo histórico.

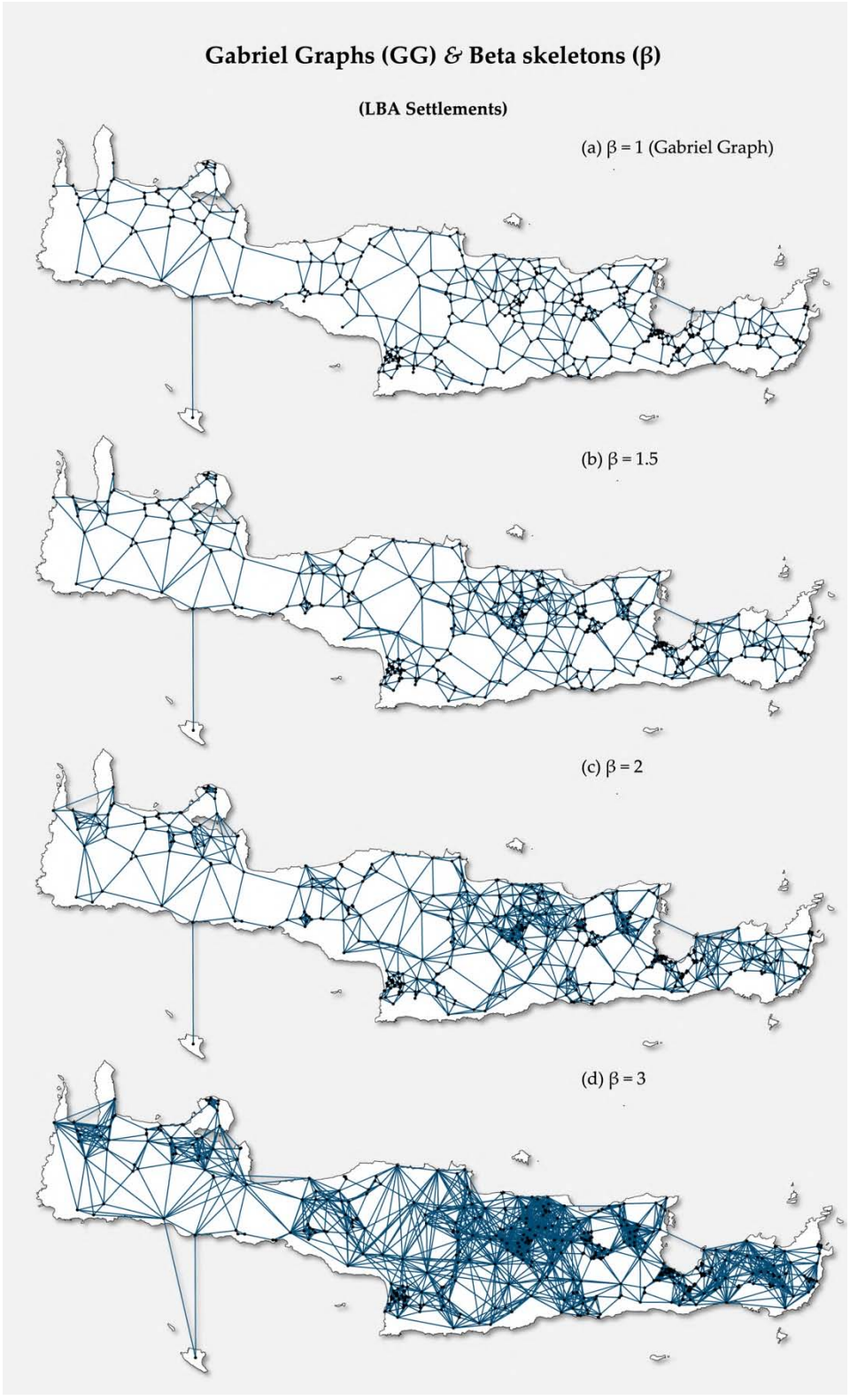


Figura 5.36. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al Bronce Final.

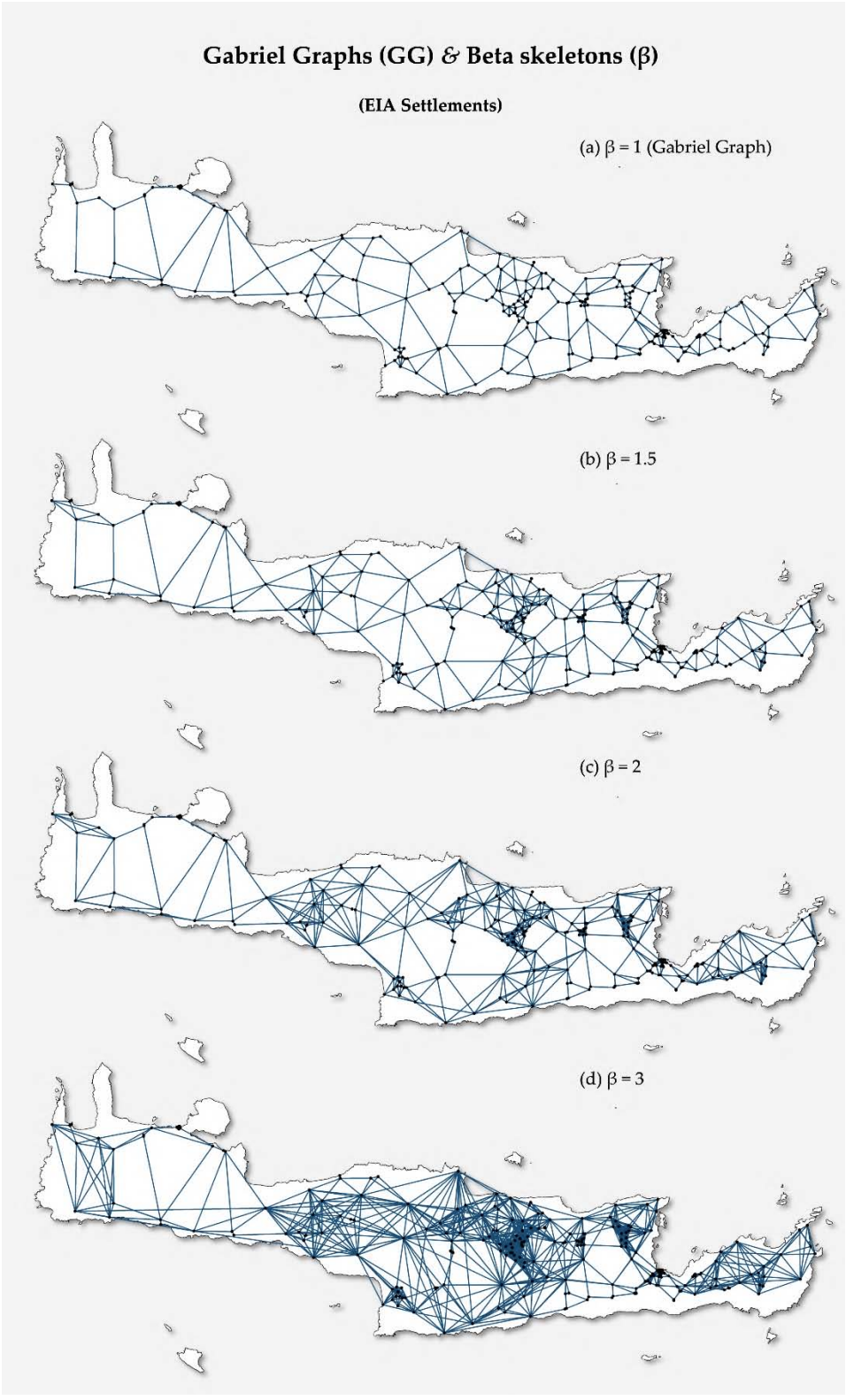


Figura 5.37. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al inicio de la Edad del Hierro.

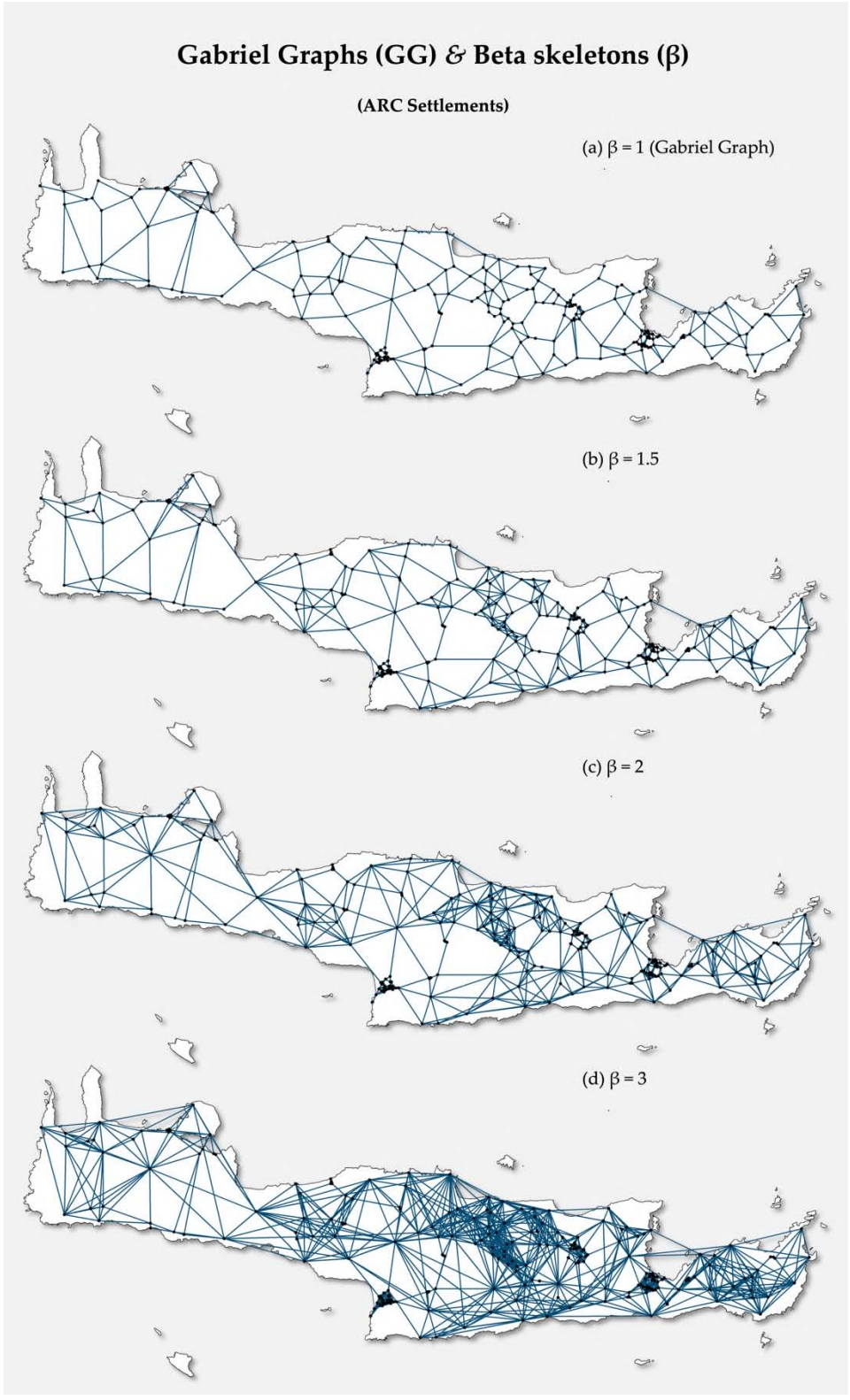


Figura 5.38. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Arcaico.

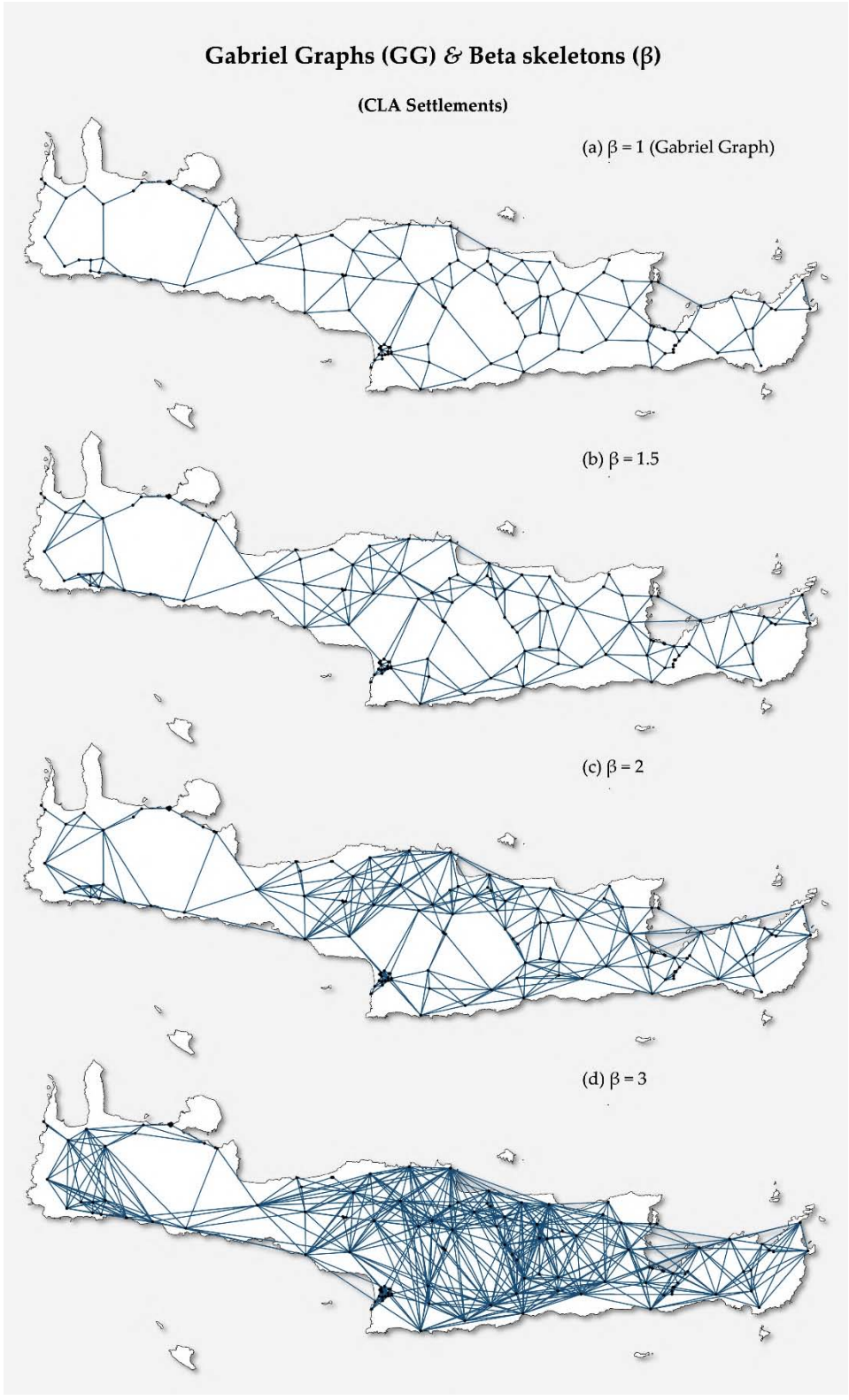


Figura 5.39. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Clásico.

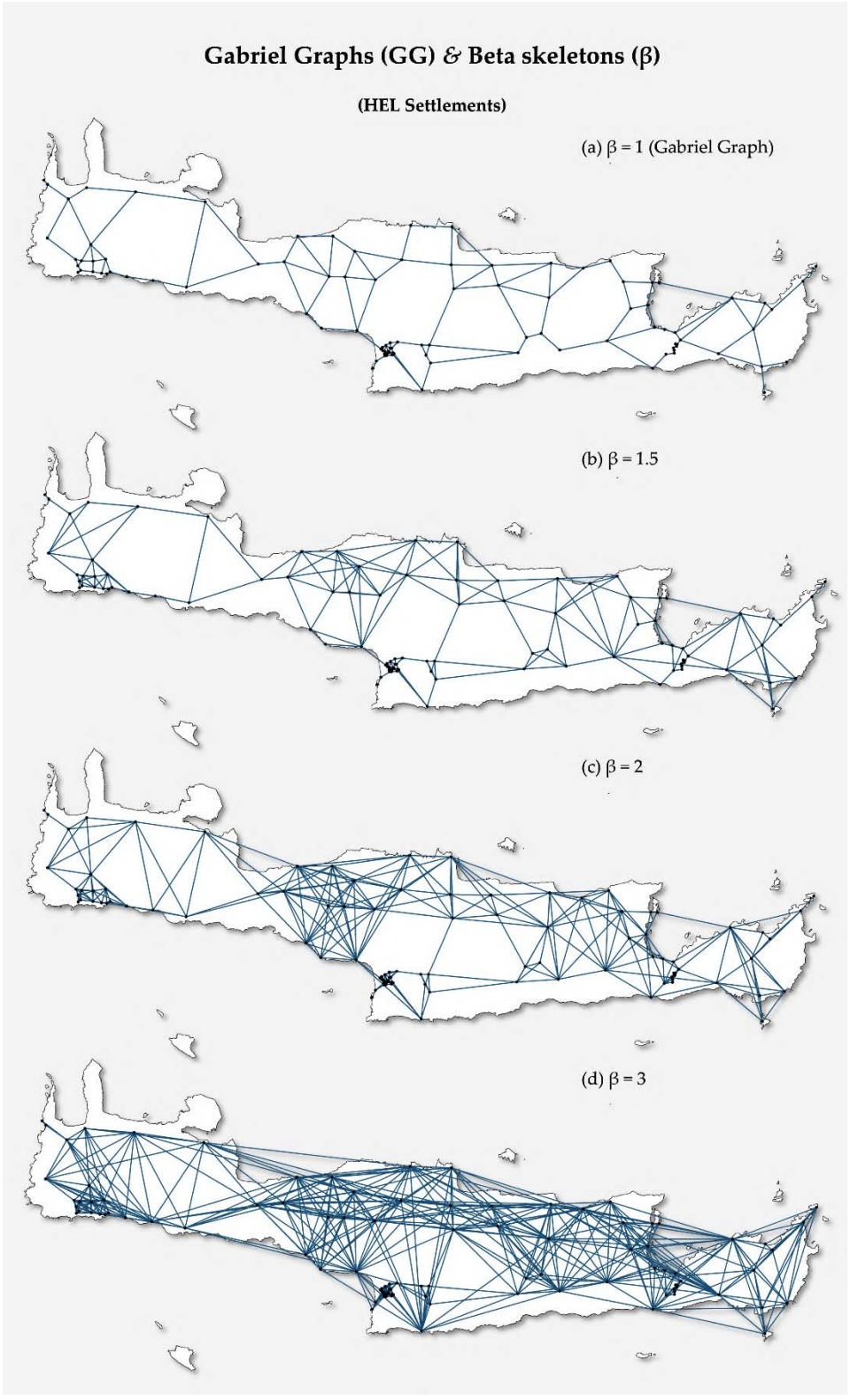


Figura 5.40. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Helenístico.

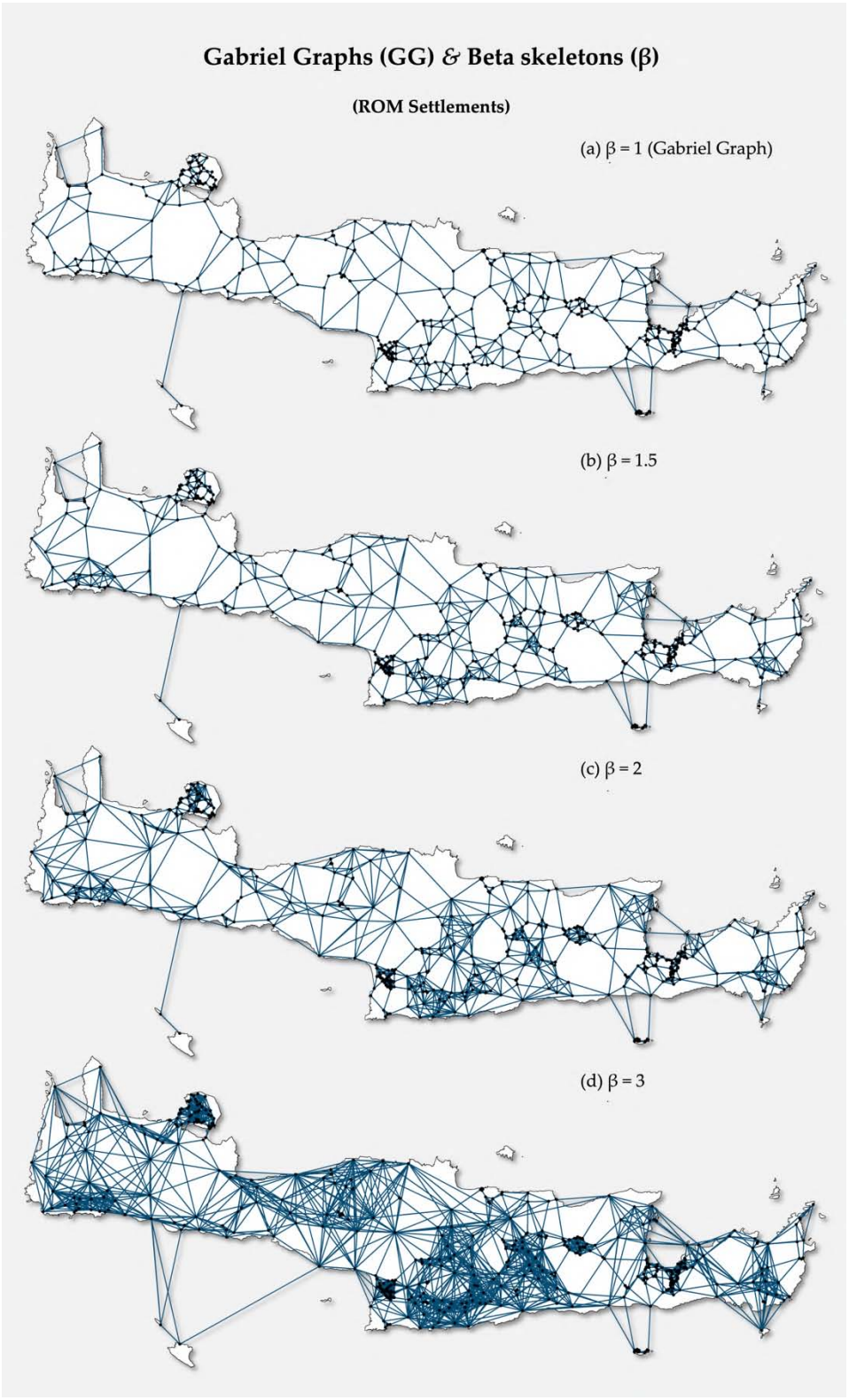


Figura 5.41. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Romano.

Tabla 5.4. Resultados tras aplicar el modelo GG y *β-Skeletons,* indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad.

Temporalities	Scale	Nodes (Settlements)	Edges	Average Degree	Density
LBA	β = 1 (Gabriel Graph)	459	776	3.381	0.0073
	β = 1.5	454	775	3.414	0.0075
	β = 2	459	1237	5.389	0.0075
	β = 3	459	2402	10.466	0.0117
EIA	β = 1 (Gabriel Graph)	293	485	3.310	0.0113
	β = 1.5	288	486	3.375	0.0117
	β = 2	290	763	5.262	0.0182
	β = 3	293	1431	9.767	0.0334
ARC	β = 1 (Gabriel Graph)	303	504	3.326	0.0110
	β = 1.5	298	528	3.543	0.0119
	β = 2	303	832	5.491	0.0181
	β = 3	303	1539	10.158	0.0336
CLA	β = 1 (Gabriel Graph)	180	287	3.188	0.0178
	β = 1.5	179	331	3.698	0.0207
	β = 2	179	511	5.709	0.0320
	β = 3	180	980	10.888	0.0608
HEL	β = 1 (Gabriel Graph)	104	159	3.057	0.0296
	β = 1.5	103	192	3.728	0.0365
	β = 2	104	314	6.038	0.0586
	β = 3	104	567	10.903	0.1058
ROM	β = 1 (Gabriel Graph)	515	852	3.308	0.0064
	β = 1.5	511	877	3.432	0.0067
	β = 2	513	1395	5.438	0.0106
	β = 3	515	2600	10.097	0.0196

5.4.2 Marmárica (NE-Libia / NO-Egipto)

Para comprender cómo se articulaba la movilidad en la región de Marmárica, igualmente se aplicó el método de redes de movilidad focal (FMN), tal como se ha descrito en este capítulo. Este enfoque requirió un exhaustivo trabajo preliminar para construir una superficie de coste o fricción (ACS), que integrara de manera efectiva los costes de desplazamiento entre diferentes puntos del paisaje, teniendo en cuenta los factores específicos que influían en la movilidad de esta región. Entre ellos se incluyen características del terreno, como la pendiente, así como la presencia de obstáculos naturales y factores ambientales, como la disponibilidad de recursos hídricos. Este último aspecto es particularmente relevante en este caso, dado que el entorno, predominantemente caracterizado por su aridez, hace que la proximidad a fuentes de captación de agua haya sido —y continúe siendo— un factor determinante en la configuración de la movilidad histórica en esta región.

Por lo tanto, las variables consideradas en este estudio de caso específico se centran fundamentalmente en aspectos relacionados con la orografía de la región y sus características hidrográficas. En cuanto a la primera, se ha determinado mediante el cálculo de la pendiente, lo que ha permitido identificar las zonas más accesibles o de mayor dificultad para el tránsito. Respecto a la segunda, su modelización ha supuesto un desafío considerable, ya que la red hidrográfica está compuesta por diversos elementos que presentan tanto factores favorables como restrictivos para la movilidad. Estos incluyen, principalmente, zonas de captación, almacenamiento y redistribución de recursos hídricos (principalmente cisternas), la presencia de cauces secos o con potencial de inundación estacional, conocidos como *wadis*, así como áreas extensas de cuerpos de agua, como cuencas endorreicas y

depresiones salinas. En este contexto, dado que no se disponía de datos o información previa que definiera estos elementos, se asumió el reto de generarlos en el contexto de esta investigación.

Para abordar este desafío, se utilizó un modelo digital de elevación (SRTM) con una resolución de 30 metros, complementado con los resultados obtenidos en los análisis previos de la región (véase Cap. III, 3.4.2 Marmárica, NE-Libia/NO-Egipto). Este enfoque permitió la integración de una amplia variedad de datos geográficos y ambientales, proporcionando un marco comprensivo que reflejara con precisión las condiciones medioambientales de esta región. Como resultado, se identificaron diversos nichos ecológicos, cada uno definido por propiedades y características particulares, tales como la disponibilidad de agua, la tipología del suelo y las condiciones climáticas. Estos factores no solo habrían influido en el potencial de ocupación y uso del territorio, sino también en la viabilidad de la movilidad en cada área. Por lo tanto, su evaluación resulta crucial para comprender el impacto que ejercen en los patrones de desplazamiento modelados en este estudio.

En particular, como se ha destacado, la zona costera (*Coastal Zone*) recibe la mayor cantidad de precipitaciones anuales en comparación con otras áreas. Además, en esta región se ha identificado una extensa red de *wadis*, que redistribuyen y canalizan la escorrentía desde las llanuras aluviales. En la meseta norte (*Northern Tableland*) y la llanura Premarmárica (*Pre-Marmarica Plain*), las precipitaciones disminuyen progresivamente hacia el sur, siendo los *wadis* con mayor capacidad de acumulación aquellos que drenan las laderas, desembocando en las zonas costeras o en cuencas endorreicas. Por otro lado, la meseta de Marmárica (*Marmarica Plateau*) presenta un contexto completamente distinto, caracterizado por altiplanos mayoritariamente

desérticos, propios de ambientes esteparios. En esta área, las cisternas constituyen el único recurso hídrico, resultando cruciales para la movilidad a media y larga distancia entre los asentamientos costeros y los oasis del interior (Figura 5.42).

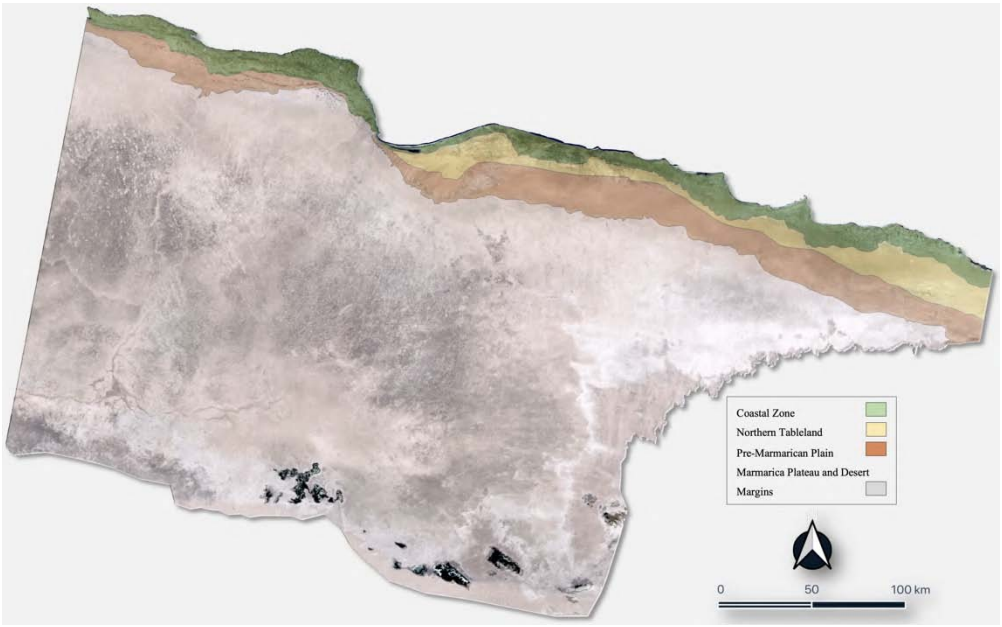


Figura 5.42. Delimitación de las distintas zonas ecológicas que conforman la región de Marmárica.

Una vez definidas estas zonas y vectorizados los cuerpos de agua, así como las fuentes de captación, almacenamiento y redistribución de recursos hídricos en la región, resultó necesario identificar y delimitar la localización y distribución de los *wadis* para completar la red hidrográfica del área de estudio. Para este propósito, se utilizaron diversas herramientas de análisis hidrológico integradas en el propio SIG, lo que permitió calcular los valores de acumulación de flujo para cada celda (píxel) de las distintas zonas consideradas. Posteriormente, se aplicó una reclasificación específica a cada área, con el objetivo de representar con precisión la presencia de estos elementos clave, como se detalla a continuación:

1. **Zona Costera** (*Coastal Zone*): Reclasificación basada en los valores de acumulación de flujo más altos, debido a las precipitaciones anuales de 180-160 mm. Aunque estos datos no son elevados, se identificaron estructuras históricas diseñadas para recoger y aprovechar la escorrentía estacional, como aterrazamientos, zonas de almacenamiento y el uso de los *wadis* para actividades agrícolas, que datan al menos desde el II Milenio a.C. (Vetter, Rieger & Möller, 2013; Rieger, 2019, 2023).
2. **Meseta Norte** (*Northern Tableland*) y **Llanura Premarmárica** (*Pre-Marmarica Plain*): Reclasificación moderada, centrada solo en los *wadis* con mayor potencial de acumulación, ya que la precipitación anual varía entre 160-75 mm.
3. **Meseta de Marmárica** (*Marmarica Plateau*): Reclasificación mínima debido a las condiciones áridas de la zona, con pluviosidad de 20-40 mm anuales. Aquí, la pendiente es el principal indicador de la transitabilidad en estos cauces.

Los resultados obtenidos a partir del análisis fueron reclasificados de manera binaria con el fin de identificar la presencia o ausencia de *wadis* y otros elementos hidrológicos significativos dentro de cada una de las zonas analizadas. Cabe destacar que cada umbral establecido fue cuidadosamente revisado para garantizar que esta reclasificación ofreciera una representación precisa de la red hidrográfica de la totalidad del área de estudio, capturando todos los elementos clave para el análisis. Además, para validar estos resultados, se utilizaron fotografías aéreas históricas e imágenes satélite, confirmando que los umbrales y la delimitación obtenidos reflejaban de manera fiel la realidad hidrográfica de la región (Figura 5.43).

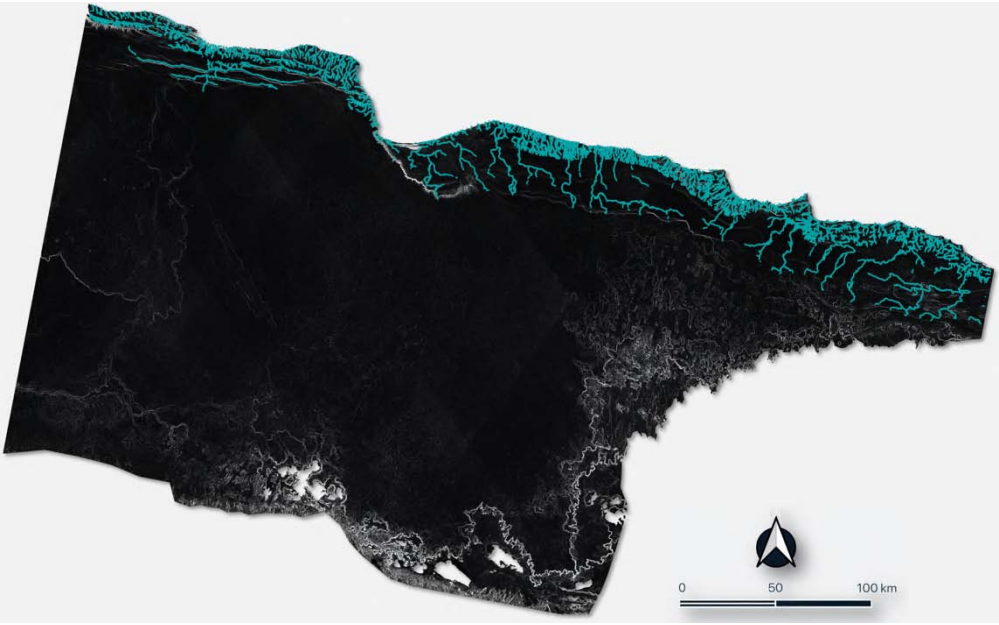


Figura 5.43. Red completa de *wadis* (en azul) presente en la región de Marmárica, y generada en el contexto de esta investigación. En esta representación se muestran las conexiones, ramificaciones y direcciones de estos elementos a lo largo del área de estudio.

(1) Coastal Zone

Old values	New values	
1 - 200	1	= No Wadi
> 200	9	= Wadi

(2) Northern Tableland y Pre-Marmarica Plain

Old values	New values	
1 - 6300	1	= No Wadi
> 6300	9	= Wadi

(3) Marmarica Plateau (solo el cálculo de la pendiente).

Dado que el objetivo era generar una superficie de coste o mapa de fricción (ACS) que integrara los *wadis* y otros componentes de la red hidrográfica de Marmárica —ya que representaban una de las variables más significativas que condicionan la movilidad—, resultaba fundamental establecer mecanismos que permitieran cuantificar y asignar una resistencia gradual al paso de estos elementos. No obstante, aunque estructuras como los *wadis* podían representar una barrera debido a su potencial de acumulación de flujo o su uso para actividades agrícolas (especialmente en la zona costera), también podían facilitar el desplazamiento al actuar como corredores o pasos naturales en un entorno caracterizado por su aridez. Del mismo modo, las cisternas servían como puntos estratégicos de abastecimiento de agua, permitiendo el desplazamiento a media y larga distancia en una región con escasez de recursos hídricos. Por lo tanto, resultaba imprescindible modelar este doble rol —facilitador y restrictivo— desempeñado por la red hidrográfica, teniendo en cuenta, además, las particularidades que caracterizan las distintas zonas ecológicas de esta región.

El enfoque finalmente adoptado se fundamentó en la consideración de que las condiciones climáticas en Marmárica son relativamente estables a lo largo de todo el año, y que las variaciones dependen principalmente de la zona geográfica en la que se sitúe cada elemento. Sobre esta base, se llevaron a cabo una serie de operaciones utilizando los valores de acumulación de flujo calculados para la red hidrográfica, integrando tanto los factores favorables como restrictivos, y ajustándolos según las características ambientales propias de cada zona ecológica. A continuación, se detallan los pasos y parámetros específicos empleados para asignar el factor "restrictivo" a estos elementos, atendiendo a las particularidades de la zona en la que se encuentren:

1. **Zona Costera** (*Coastal Zone*): Se aplicó la expresión Con ("ACCUM" > 200, "ACCUM" * 15 / MaxAccum, 0), donde "ACCUM" representa la acumulación de flujo y "MaxAccum" el valor máximo de acumulación de la red. Esta expresión convierte los valores mayores a 200 en un gradiente de 0 a 15, reflejando un comportamiento similar al de una pendiente orográfica (de 0 a 15%).
2. **Meseta Norte** (*Northern Tableland*) y **Llanura Premarmárica** (*Pre-Marmarica Plain*): Se reemplazó el valor de acumulación de flujo tal como se representa en la figura anterior (véase Figura 5.43). Esta modificación refleja el hecho de que solo los cauces con alto potencial de acumulación afectarían al desplazamiento en estas zonas.
3. **Meseta de Marmárica** (*Marmarica Plateau*): En esta zona, debido a la aridez generalizada, no se consideraron los valores de acumulación de flujo. En cambio, se utilizó únicamente el cálculo de la pendiente como indicador de transitabilidad.

Adicionalmente, se introdujo un segundo factor para "favorecer" los desplazamientos hacia las áreas cercanas a los puntos de captación de agua. Para lograrlo, se incrementó la fricción en las áreas alejadas de estos recursos, equiparando los *wadis* (polilíneas) con las cisternas (puntos) como una misma entidad en el análisis. Seguidamente, se asignó una fricción adicional a las zonas ubicadas a más de 5 km (zona de influencia) de un punto de captación de agua, equivalente a la fricción de una pendiente del 10%. Esta fricción disminuía gradualmente en un radio de 5 km hasta llegar a 0 en los puntos de captación. La expresión utilizada fue: Con ("D" > 5000, 10, "D" * 10 / 5000), donde "*D*" representa la distancia euclidiana a la cisterna más cercana. Este procedimiento permitió integrar de manera efectiva el impacto de la

disponibilidad de agua sobre la movilidad en el entorno árido de Marmárica, favoreciendo las rutas más cercanas a los recursos hídricos clave (Figura 5.44).

Es importante destacar que, al aplicar esta función, se logró reducir la influencia de las cisternas documentadas en la zona costera —debido a la proximidad entre ellas— donde su impacto en la movilidad era menor, gracias a la mayor disponibilidad de recursos hídricos. Esto permitió enfocar el análisis en los puntos de captación de agua más estratégicos y críticos situados en las zonas áridas del interior, donde el acceso a este tipo de recursos desempeñaba un papel crucial para facilitar el desplazamiento.

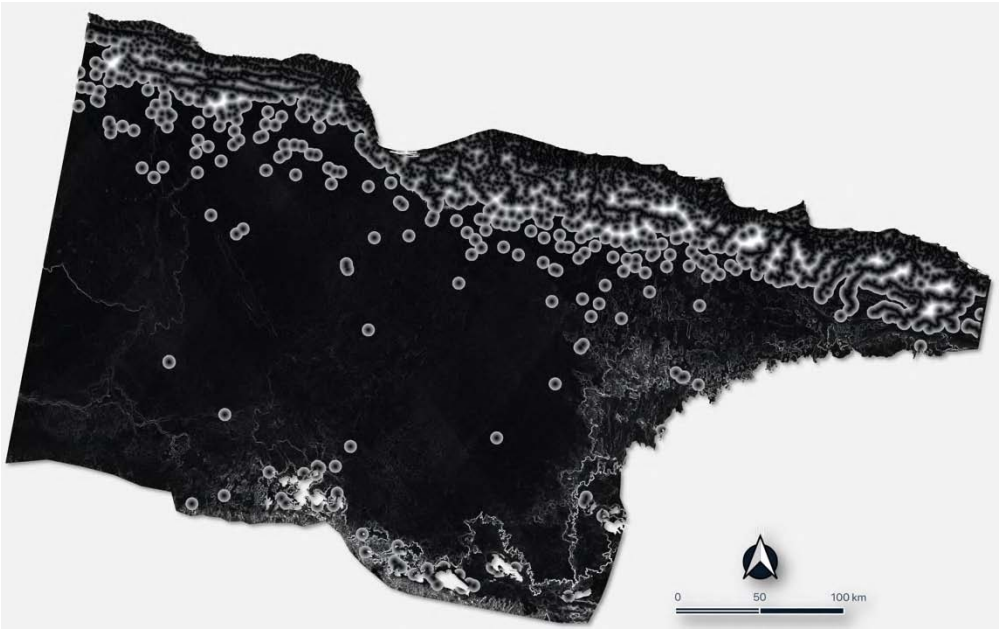


Figura 5.44. Resultados de la red hidrográfica de Marmárica, obtenidos tras aplicar un doble factor de coste -facilitador y restrictivo-. En este modelo, se incorpora un coste o fricción gradual al desplazamiento fuera de las zonas de influencia de 5 km de los elementos hidrográficos, además de asignar un coste específico al cruce en las áreas con mayor acumulación de flujo (potencial de inundabilidad), alcanzando hasta un 15% de fricción adicional en estas zonas. Asimismo, se puede observar cómo se han eliminado las zonas correspondientes a masas de agua para evitar que el modelo las identifique como áreas de mayor facilidad al tránsito debido a la pendiente, mejorando así la precisión del análisis de movilidad.

Una vez obtenidos los resultados de la red hidrográfica, con el coste al cruce gradual basado en el potencial de acumulación, y del ráster que refleja la fricción asociada al acceso a los recursos hídricos, se procedió al cálculo de la pendiente para toda la región de Marmárica. Este cálculo se realizó en porcentajes utilizando el modelo digital de elevación (DEM) previamente mencionado. Dado que la orografía de Marmárica es predominantemente plana, la resolución del DEM se redujo a 90 metros para optimizar el coste computacional de los análisis, sin comprometer la precisión de los resultados.

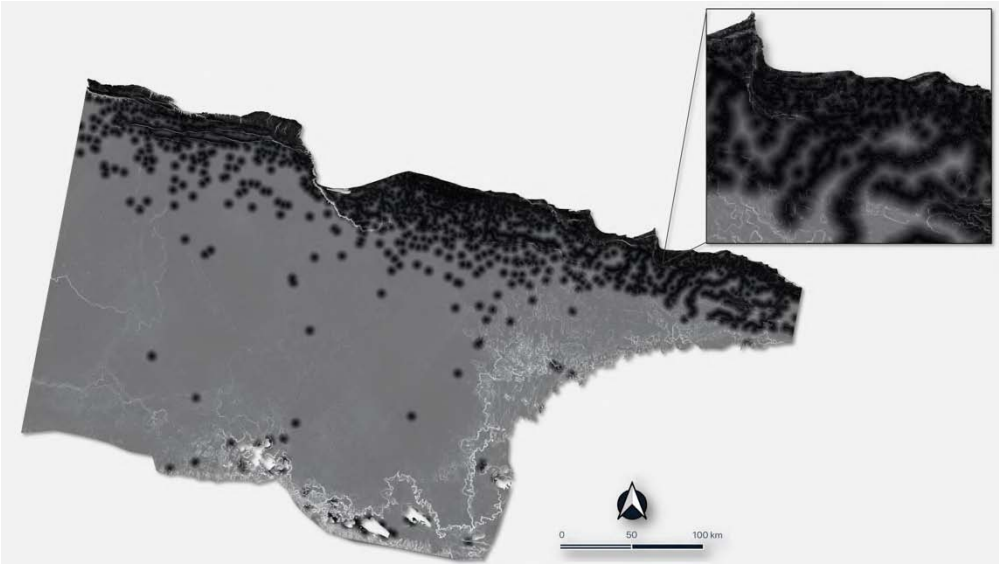


Figura 5.45. Representación de la superficie de coste o mapa de fricción final (ACS).

Finalmente, se integró la regla de Naismith detallada en este capítulo, utilizando la siguiente ecuación: X = 0.0833 * P + 1, donde *P* corresponde a la pendiente expresada en porcentaje, y *X* representa la fricción. Los valores obtenidos indican la resistencia al desplazamiento en función de la inclinación del terreno, los cuales se visualizan mediante una escala de tonalidades. En esta representación, los tonos más claros indican una mayor resistencia al desplazamiento, mientras que los tonos más oscuros reflejan las áreas con menor resistencia (Figura 5.45).

Tras obtener el mapa de superficie de coste o fricción final (ACS), siguiendo el procedimiento descrito en el estudio de caso anterior, se procedió a crear una malla o *grid* de puntos que cubriera uniformemente toda el área de estudio. Dado el tamaño de la región en cuestión, se generaron puntos con una separación de 10 km entre ellos, lo que resultó en un total de 1.155 puntos que actuaron como lugares de destino (Figura 5.46). Con los puntos de destino y el ACS integrados, se ejecutó la secuencia de operaciones del FMN. Para optimizar y automatizar todo el proceso, se utilizó el mismo procedimiento implementado mediante código en Python que permite encadenar las operaciones de manera secuencial. No obstante, a diferencia del estudio anterior, donde tanto la generación de los puntos como la ACS se automatizaban como parte del proceso, en este caso, al haber generado estos elementos de manera independiente, ajustamos el código para comenzar directamente la secuencia de operaciones que conlleva el FMN.

Este procedimiento implicó, en primer lugar, calcular la distancia de coste (*cost distance*) desde cada celda (píxel) que conforma el área de estudio hasta cada punto de destino, utilizando la capa de fricción generada previamente. Posteriormente, a través de herramientas de análisis hidrológico, se determinó la dirección de flujo (*flow direction*) basada en la capa de distancia de coste obtenida en el paso anterior. A continuación, se calculó la acumulación de flujo (*flow accumulation*) de desplazamiento para cada uno de los 1.155 puntos, empleando la dirección de flujo generada. Este cálculo produjo una capa ráster en la que el valor de cada píxel representaba el grado de acumulación de desplazamiento hacia los diferentes puntos. Finalmente, al promediar las 1.155 capas de acumulación de flujo, se identificaron los corredores o rutas potenciales que estructuran el paisaje de esta región norteafricana (Figura 5.47).

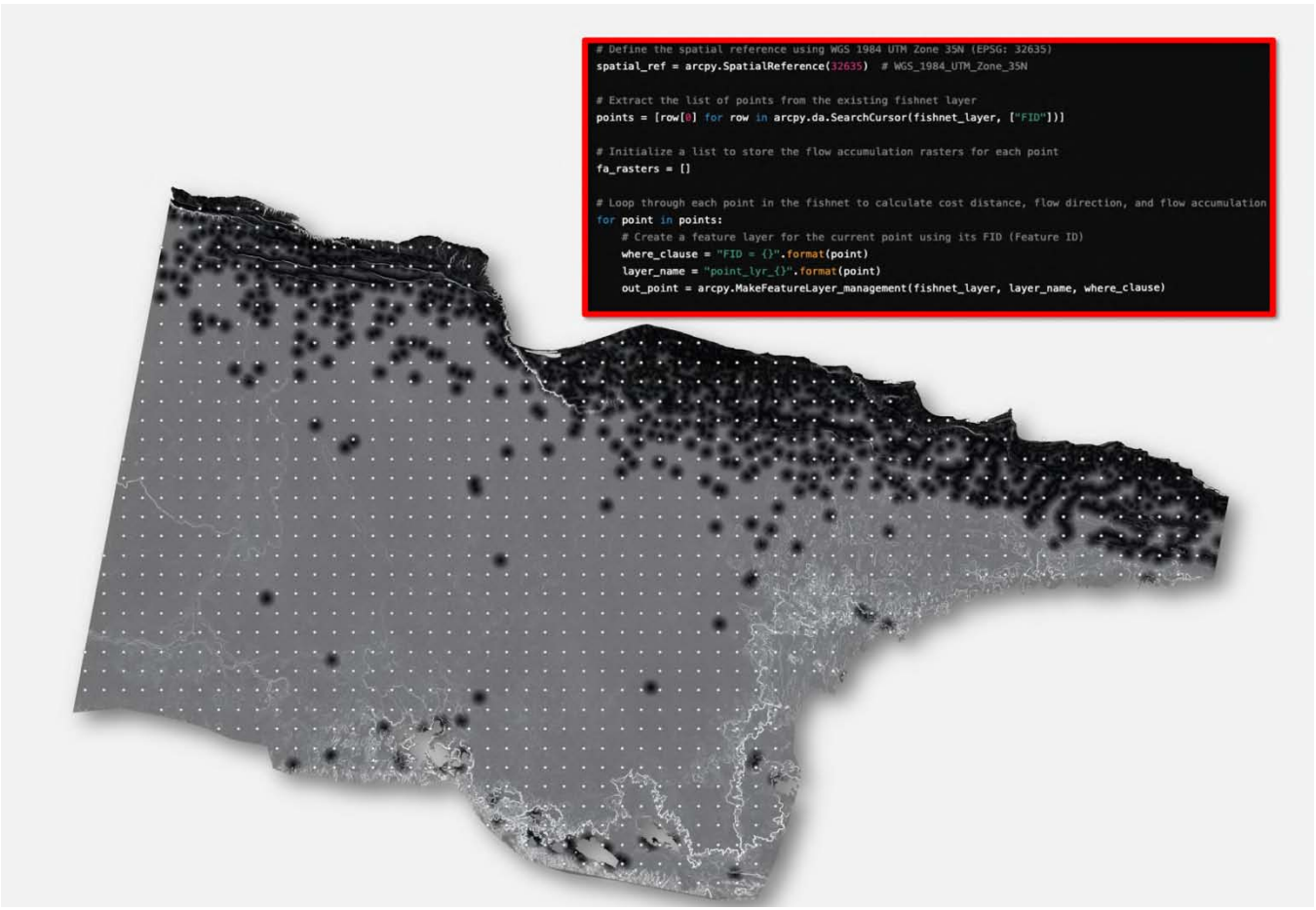


Figura 5.46. Malla o *grid* de puntos (1.155 puntos de destino) separados a una distancia uniforme de 10 km entre sí, cubriendo la totalidad del área de estudio.

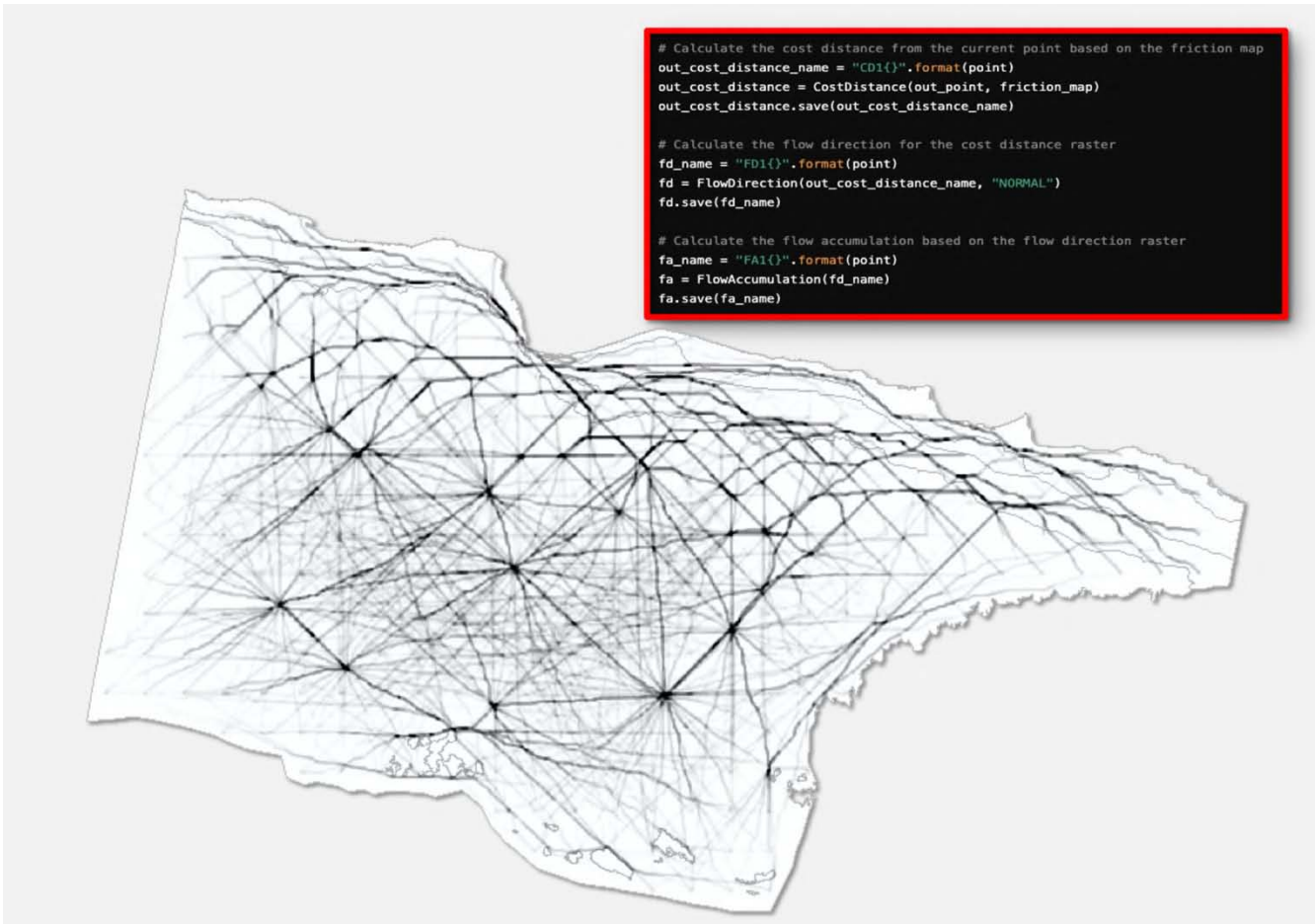


Figura 5.47. Resultados preliminares tras la aplicación del método FMN, mostrando una alta densidad de rutas o corredores potenciales que cubren la totalidad de la región de Marmárica.

Como se observa en la figura 5.47, los resultados preliminares obtenidos tras la aplicación del FMN muestran la generación de una gran cantidad de rutas o corredores potenciales. Esta multiplicidad se debe a la propia naturaleza del método y su conexión exhaustiva hacia todos los puntos de destino que cubren de manera uniforme la totalidad del área de estudio. Aunque esta sobrerrepresentación puede reflejar el potencial de movilidad en la región, también implica complejidad a la hora de tratar de interpretar los resultados. Por lo tanto, para facilitar su análisis, fue necesario centrarse únicamente en los trazados más significativos —i.e., aquellos con mayor potencial de movilidad—. Para ello, se aplicó el mismo criterio de reclasificación basado en la desviación estándar de ¼ (Déderix, 2016; Stančo & Pažout, 2020), ya que garantizaba que las rutas más cercanas al valor promedio se mantuvieran, facilitando así una representación más clara de las estructuras de movilidad predominantes en la región.

Sin embargo, tras aplicar esta reclasificación e incluso experimentar con distintas variantes, se evidencian dos problemáticas de manera persistente. La primera es que el modelo tiende a producir una gran cantidad de rutas, especialmente en las zonas centrales. El segundo es el denominado "efecto borde", que implica la pérdida de información hacia los límites del área de estudio (Figura 5.48). Dado que no era viable ampliar el área ni añadir más puntos por el elevado coste computacional, se desarrolló un algoritmo matemático —el cual se ha detallado en este capítulo—, basado en una reclasificación estadística que permite normalizar los rangos de acumulación de flujo, con el objetivo de reducir tanto el "ruido" en las áreas centrales como mitigar el efecto borde hacia los límites del área de estudio, mejorando así la claridad y precisión de los resultados (véase Cap. V, 5.2.3 Gestión de la incertidumbre en el análisis geoespacial).

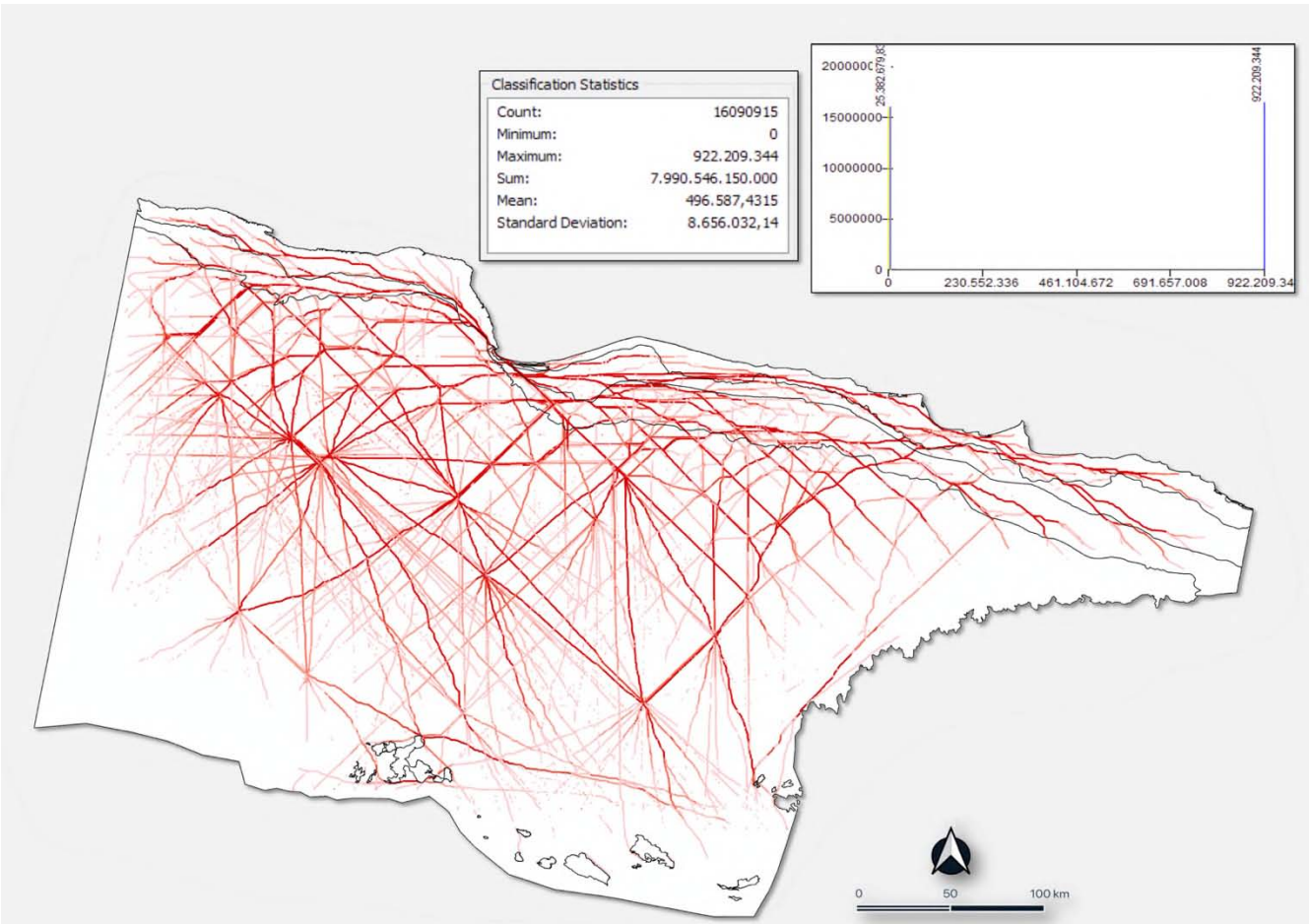


Figura 5.48. Tras el proceso de reclasificación de los resultados se evidencian dos problemas comunes en este tipo de análisis espacial: (i) el conocido como "efecto borde," caracterizado por la pérdida de información hacia los límites del área de estudio, y (ii) una alta densidad de rutas en las zonas centrales, debido al mayor grado de intermediación que presentan estas áreas.

Por lo tanto, observamos que independientemente del tipo de reclasificación que se utilice sobre los valores de acumulación, la red obtenida muestra dos limitaciones significativas que deben ser abordadas cuando se aplican este tipo de aproximaciones basadas en análisis de superficie de coste acumulado. En primer lugar, como se ha destacado, en toda la zona central, los corredores o rutas potenciales tienden a abarcar gran parte del territorio, es decir, se generan una gran densidad de rutas potencialmente transitables, con una tendencia a que estas se definan mediante líneas excesivamente rectas. Este primer fenómeno ocurre debido a que las zonas centrales presentan un mayor grado de intermediación. El segundo, en cambio, se debe específicamente a la orografía mayormente plana de Marmárica —lo que se traduce en costes de desplazamiento muy bajos—, sin la presencia de grandes pasos naturales que conecten diferentes áreas, salvo las excepciones de la zona costera y los oasis del interior. En segundo lugar, se ha observado la aparición del conocido como "efecto borde", que implica una pérdida o disminución de información en las zonas periféricas del área de estudio. Este fenómeno, identificado en otros estudios arqueológicos similares (p. ej., Déderix, 2016), se debe al menor grado de intermediación en los límites del área analizada, lo que limita la obtención y visualización de resultados en estas zonas.

Para afrontar esta problemática, se normalizaron los resultados de acumulación de flujo utilizando una función continua adaptada a las condiciones específicas de este estudio. En este sentido, el primer paso implicó calcular la distancia euclidiana para toda el área de estudio, con el objetivo de establecer divisiones en los valores de acumulación previamente convertidos en porcentajes. Este proceso se realizó aplicando la siguiente expresión:

Flow_Acc / (Euc_Dist * 100 / MED)

Donde:

- *"Flow_Acc"* es la capa ráster con los datos de acumulación de flujo,
- *"Euc_Dist"* corresponde a la capa ráster con los valores de distancia euclidiana.
- *"MED"* es la distancia máxima de la capa de distancia euclidiana, en este caso 117,434 metros.

Para "refinar" aún más la red, utilizamos una función similar que descartaba gradualmente los valores de acumulación de flujo, con el objetivo de obtener un modelo de red más claro y representativo de aquellos corredores principales. Esto requirió examinar los valores de acumulación de flujo en los píxeles más cercanos y alejados de los límites del área de estudio, además de considerar la distancia máxima desde estos límites. Con estos datos e información, se aplicó la siguiente expresión:

Flow_acc = Flow_min + (Euc_Dist * (Flow_max - Flow_min)) / Dist_max

Donde:

- *"Flow_acc"* es el valor de acumulación de flujo a partir del cual se genera la red.
- *"Flow_min"* es el valor de acumulación más cercano al borde del área (valor mínimo).
- *"Euc_Dist"* es la distancia euclidiana.
- *"Dist_max"* es la distancia máxima desde el borde.

Esta ecuación hizo posible descartar de forma progresiva las celdas (píxeles) con valores de acumulación por debajo de los umbrales seleccionados (basados en la desviación estándar ¼). Para ello, se seleccionaron dos

umbrales clave: el primero, 1,578,591, para descartar los píxeles más cercanos a los límites, y el séptimo valor, 14,562,640, para los píxeles más centrales del área de estudio. Así, la expresión final fue:

Euc_Dist * (14,562,640 - 1,578,591) / 117,434 + 1,578,591

Dando como resultado una capa ráster con valores entre 1,578,591 y 14,562,640. A continuación, esta capa, denominada *R*, se empleó para asignar el valor "*NoData*" a todos los píxeles con valores inferiores a *R*, utilizando la siguiente expresión:

SetNull (Flow_Acc < R, Flow_Acc * 100 / 117,434)

Donde *Flow_Acc* es la capa de acumulación de flujo y *R* es la capa generada previamente. Este proceso produjo en un archivo ráster que muestra únicamente los valores superiores a los umbrales seleccionados, normalizados para ser comparables en toda el área de estudio. Esto hizo posible optimizar las rutas potenciales de tránsito de Marmárica, destacando las redes más relevantes en términos de flujos de movilidad histórica. Por tanto, la aplicación del factor corrector matemático para la normalización de los resultados ha permitido: (i) reducir la densidad de los corredores en las zonas con mayor intermediación, manteniendo solo aquellos con un mayor potencial de acumulación de flujo —i.e., mayor potencial de movilidad; y (ii) mejorar la representatividad en las zonas periféricas, mitigando las limitaciones previamente mencionadas (Figura 5.49).

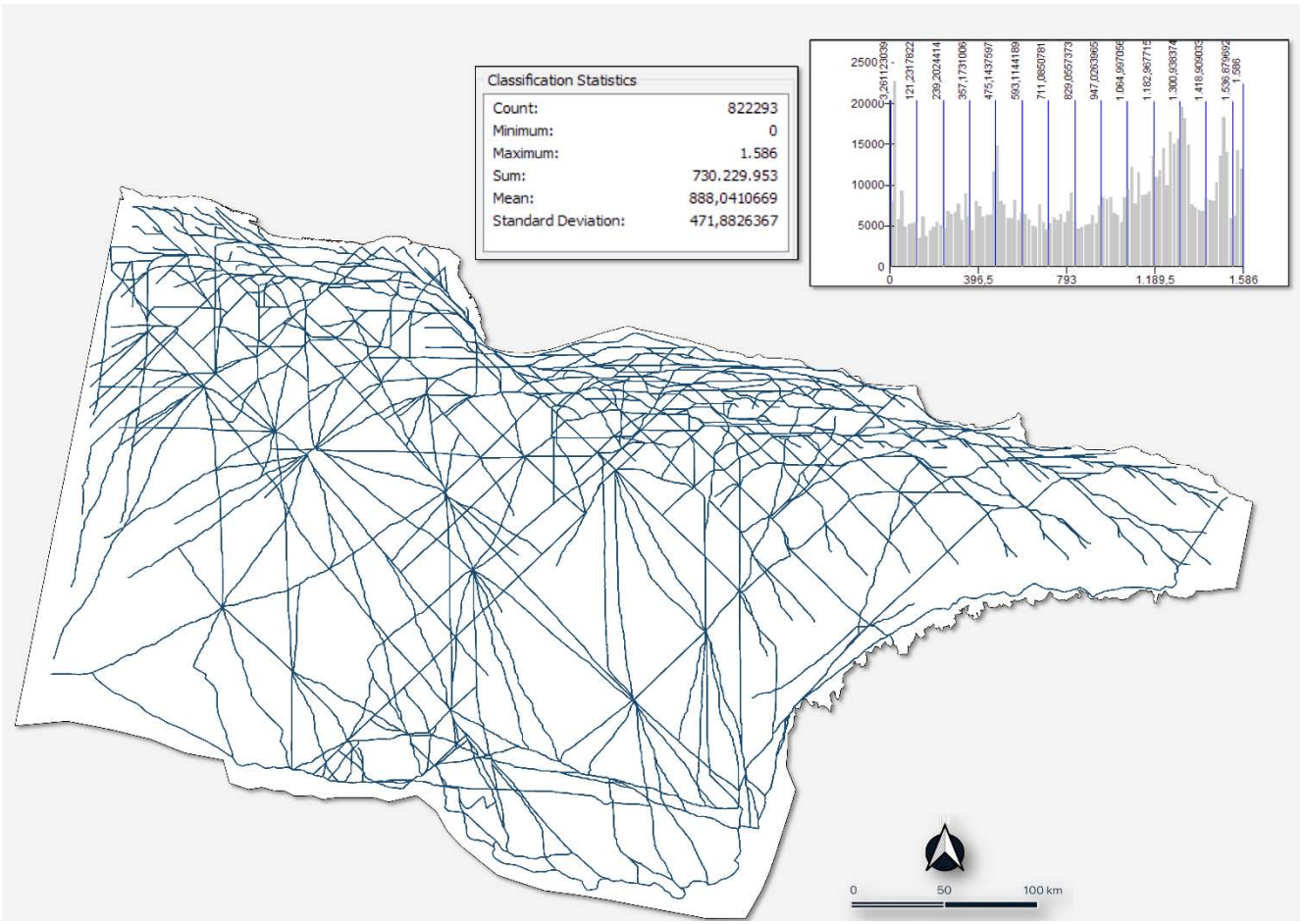


Figura 5.49. Resultados tras aplicar el método de reclasificación estadística, que permite normalizar los datos para reducir la pérdida de información hacia los límites del área de estudio y "refinar" la red en las zonas centrales, evitando así una alta densidad de rutas que podrían dificultar la interpretación de los resultados.

Al examinar los resultados obtenidos, en términos generales, se identifican algunos de los supuestos relacionados con las hipótesis iniciales. Uno de los más destacados es la alta densidad de corredores o rutas potencialmente transitables que se concentran a lo largo de las zonas costeras y las áreas más septentrionales de Marmárica, es decir, la zona que delimita al norte por el Mar de Libia y al sur por las barreras naturales de *wadis* que descienden desde la meseta de Marmárica. Cabe destacar que esta concentración de rutas es especialmente significativa en Marmárica oriental (noroeste de Egipto). Además, al analizar estos corredores en mayor detalle, se observa que ciertas áreas geográficas parecen desempeñar un papel clave en la articulación de la movilidad regional. Un ejemplo significativo es la zona en torno a la bahía de Sollum, ubicada a pocos kilómetros al este de la frontera actual con Libia (extremo noroeste de Egipto), que parece funcionar como un eje de conexión entre los corredores que se extienden en dirección este-oeste a lo largo de la costa libio-egipcia. De manera similar, el área de Marsa Matruh (noroeste de Egipto) destaca por dar continuidad a estos corredores, al tiempo que redistribuye otros hacia el interior, siguiendo el eje norte-sur.

Además de las altas concentraciones de rutas potencialmente transitables en las zonas mencionadas, los resultados también revelan una densa red de enlaces que conectan los oasis del interior. Estos corredores se extienden a través de territorios marcados por su aridez, estructurándose en torno a conexiones de media y larga distancia que siguen principalmente el eje norte-sur, enlazando las áreas costeras con los oasis de Al-Jaghbub (noreste de Libia), Siwa y Qara (noroeste de Egipto). Asimismo, se observan conexiones a corta distancia, que vinculan los oasis entre sí y con otras áreas periféricas, reforzando su integración en la red regional de movilidad.

Es importante destacar que los resultados corroboran los patrones observados durante la fase de análisis sobre la localización y distribución de los sitios arqueológicos, que reveló que la ubicación de estos sitios está vinculada a las redes de comunicación detectadas. Esto se evidencia en la presencia de importantes puertos marítimos —tanto naturales como construidos— asociados a estas redes a lo largo de la costa libio-egipcia, como Tobruk (*Antipyrgos*), Marsa Bomba (*Aenesiphyra*), Marsa el Asi (*Azy*), Marsa Umm el Rakham (*Apis*) y Marsa Hawala (*Calamaeum*), así como los ya mencionados en la bahía de Sollum y Marsa Matruh, donde se encuentran la isla de Bates y el fuerte de época ramésida de Zawyet Umm el-Rakham. Estos sitios, que presentan numerosas evidencias de contactos con otras regiones del Mediterráneo oriental, muestran una clara vinculación a los corredores identificados, lo que sugiere que estaban integrados dentro de estas complejas redes de comunicación e intercambio.

Igualmente, destaca el papel desempeñado por la extensa red de abastecimiento de recursos hídricos, que facilitaba el desplazamiento a través de paisajes marcados por su aridez, actuando —y continúa haciendo— como puntos estratégicos de conexión. De este modo, estas zonas de captación de agua permitían articular las rutas de media y larga distancia desde las zonas costeras, atravesando la meseta de Marmárica hacia los principales oasis del interior, como Al-Jaghbub, Siwa y Qara, situados en los márgenes del desierto de Libia.

Siguiendo la hipótesis sobre la direccionalidad de las rutas de comunicación en estas regiones, los resultados obtenidos también permiten identificar cuáles eran los principales corredores, así como sus puntos de origen y destino. En este sentido, destacan principalmente dos corredores que

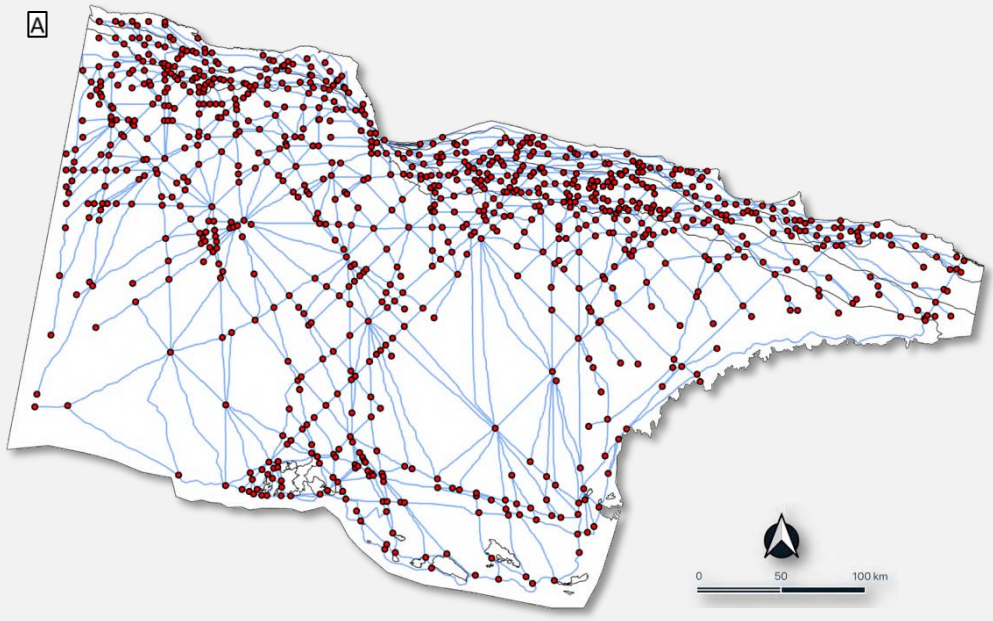
concentran los mayores valores de acumulación de flujo (potencial movilidad): (i) desde el área de Sollum y Sidi Barrani (noroeste de Egipto), al norte, cruzando la parte central de Marmárica, en la zona fronteriza actual entre Libia y Egipto, hacia el oasis de Al-Jaghbub (noreste de Libia); y (ii) desde Marsa Matruh conectando con los oasis de Siwa y Qara (noroeste de Egipto). También se observa un corredor significativo que bordea al este los límites de la Depresión de Qattara, conectando la zona costera de Al-Alamein con los oasis ya mencionados de Qara y Siwa (noroeste de Egipto). Dentro de este corredor, se identifica una posible desviación hacia un paso natural que se adentra en la Depresión de Qattara, conectando con otros oasis del desierto occidental de Egipto, aunque este último aspecto queda fuera del ámbito de análisis de este estudio.

Finalmente, los resultados subrayan la importancia de esta región como punto geoestratégico dentro de los circuitos de comunicación e intercambio entre distintas áreas clave: siguiendo los patrones de movilidad este-oeste, que conectan el valle del Nilo con la Cirenaica; y las múltiples conexiones norte-sur entre los puertos costeros mediterráneos y los oasis del interior. Además, las conexiones terrestres identificadas destacan los patrones y adaptabilidad en las dinámicas de ocupación y movilidad en entornos hostiles, fundamentales para comprender el desarrollo de estrategias de poblamiento y subsistencia en estas regiones norteafricanas. En este sentido, como se ha señalado, la accesibilidad a recursos limitados influyó de manera significativa en la organización socioespacial de los asentamientos, así como en las prácticas agrícolas y las actividades pastorales, estructurando de forma decisiva las rutas y modos de desplazamiento de las comunidades que habitaron estos paisajes.

Una vez detallados los procedimientos y resultados obtenidos durante la fase (re)constructiva específica de este caso, se procede a realizar lo propio con la fase analítica. En este punto, aunque ya se había generado un modelo representativo de las rutas de movilidad del área de estudio, fue necesario llevar a cabo una serie de operaciones adicionales para aplicar enfoques de redes a los datos. Estos pasos incluyeron: (i) la revisión y corrección topológica de posibles errores en la red, como segmentos fraccionados o intersecciones sin continuidad; (ii) la creación de nodos al inicio y final de cada segmento, almacenando también las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de cada uno de estos elementos; y, finalmente, (iii) la extracción de los valores de acumulación de flujo asociados a cada segmento. A partir de esta extracción, se calcularon diversas métricas clave, tales como el área, el número de celdas, la suma, la media, la desviación estándar, el rango y la longitud de cada tramo de ruta.

Como resultado, se obtuvo una red que integraba tanto los valores de acumulación de flujo como las métricas calculadas a partir de estos valores. Esto permitió evaluar la intensidad de las conexiones entre distintos puntos de la región y examinar el papel de los nodos que articulan dichas conexiones (Figura 5.50). De esta forma, como se ha mencionado anteriormente, estos valores proporcionan una base sólida para analizar la fortaleza de las conexiones y estudiar el comportamiento estructural de la red, facilitando el análisis de la conectividad regional. Además, estos procedimientos permitieron ampliar el análisis más allá del entorno SIG, posibilitando la exploración de estas redes desde diferentes enfoques y configuraciones. Esto ha contribuido a una comprensión más amplia y detallada de las dinámicas espaciales y relacionales en estos paisajes.

A



B

Nodes

FID	ID	Lat	Long
0	1	30.0133716475794	23.0463872773481
1	2	30.08178271239	23.0575622854979
2	3	30.4068977206629	23.1325187921164
3	4	30.9938158099196	23.200347349518
4	5	31.3083422475425	23.1924860205454
5	6	31.3966589831111	23.1889207720026
6	7	31.1260598866348	23.2007379450676
7	8	31.2168107810776	23.1971083783313
8	9	30.026583121649	23.253074913286
9	10	31.1832523087994	23.2144934683281
10	11	31.2503808855772	23.2317366622134
11	12	31.3536013455963	23.2417071854268
12	13	31.4210771343042	23.2465831444065
13	14	30.6320079504257	23.2849452119061
14	15	31.5804113541049	23.2856889182501
15	16	31.4905215634349	23.291144198343
16	17	31.8535601376021	23.277618194709
17	18	31.3115734421911	23.3029084673539
18	19	31.1300745549058	23.3392119884722
19	20	31.0532718405928	23.3487560613467
20	21	30.7024227719496	23.3648701714835
21	22	31.7164053480083	23.3315173825847
22	23	31.7928831893629	23.3328810728556
23	24	30.6827851015557	23.3849584217077
24	25	31.1311678255586	23.3778388987094
25	26	31.3133122207642	23.3737121792176
26	27	30.4563056011432	23.4133876504509
27	28	31.7515815580811	23.3700044260393
28	29	31.8775927998285	23.3793263866524
29	30	32.0339883832107	23.3731776320327
30	31	31.6725962615766	23.3882622383701
31	32	32.1247715203539	23.370539699987

Network_Marma

FID	ID	Endpoint_1	Endpoint_2	Count	Sum	Mean	Std	Range	Length
0	1	63.000000000000000	34.000000000000000	5152	246656000.0000000	47875.8984375	184573.0000000	1766300.0000000	20.8873997
1	2	70.000000000000000	76.000000000000000	1043	218383008.0000000	209380.0000000	692358.0000000	4660810.0000000	4.1454201
2	3	90.000000000000000	121.000000000000000	4151	490318016.0000000	118121.0000000	509327.0000000	5668720.0000000	16.8859005
3	4	112.000000000000000	171.000000000000000	7507	1318390016.0000000	175622.0000000	812935.0000000	9191820.0000000	30.4881992
4	5	32.000000000000000	61.000000000000000	2760	392652992.0000000	142266.0000000	518391.0000000	3196190.0000000	14.2539997
5	6	54.000000000000000	61.000000000000000	402	392652992.0000000	142266.0000000	518391.0000000	3196190.0000000	4.2722702
6	7	61.000000000000000	76.000000000000000	1824	382580000.0000000	209748.0000000	808366.0000000	5486190.0000000	9.9228802
7	8	61.000000000000000	79.000000000000000	2791	70544400.0000000	25275.6992188	79683.7031250	645239.0000000	14.4267998
8	9	76.000000000000000	121.000000000000000	4992	907782016.0000000	181847.0000000	789769.0000000	5038220.0000000	22.9090004
9	10	229.000000000000000	237.000000000000000	1298	95364704.0000000	73470.5000000	218216.0000000	1315670.0000000	5.2629902
10	11	556.000000000000000	565.000000000000000	1506	46982400.0000000	31196.8007813	137308.0000000	1595920.0000000	6.0715699
11	12	565.000000000000000	569.000000000000000	783	13315600.0000000	17005.9003906	65758.5000000	433275.0000000	3.1937599
12	13	614.000000000000000	630.000000000000000	1787	310780992.0000000	173912.0000000	584414.0000000	4053210.0000000	7.2536702
13	14	433.000000000000000	424.000000000000000	1425	2989040128.0000000	2097570.0000000	8714060.0000000	55307400.0000000	5.7980099
14	15	448.000000000000000	458.000000000000000	1851	177391008.0000000	95835.1015625	436614.0000000	5316990.0000000	7.6305199
15	16	343.000000000000000	364.000000000000000	2449	66285300.0000000	27066.3007813	90865.1015625	1009070.0000000	9.9408903
16	17	393.000000000000000	413.000000000000000	1925	50227300.0000000	26092.0996094	84641.2031250	657742.0000000	7.7933102
17	18	667.000000000000000	677.000000000000000	2780	15021600.0000000	5403.4399414	12521.7001953	287109.0000000	11.2658005
18	19	639.000000000000000	677.000000000000000	6631	873326976.0000000	131704.0000000	2582840.0000000	79608304.0000000	27.3243008
19	20	615.000000000000000	639.000000000000000	3818	243239008.0000000	63708.3984375	742434.0000000	25344200.0000000	15.6168003
20	21	571.000000000000000	615.000000000000000	7406	69413296.0000000	9372.5800781	20023.0996094	211239.0000000	31.1872997
21	22	540.000000000000000	571.000000000000000	3628	75040200.0000000	20683.5996094	63414.5000000	568790.0000000	14.8557997
22	23	403.000000000000000	442.000000000000000	6421	1218790016.0000000	189814.0000000	1347010.0000000	51756200.0000000	26.7889996
23	24	442.000000000000000	490.000000000000000	8749	201055008.0000000	22980.4003906	76560.7968750	1758660.0000000	35.6407013
24	25	490.000000000000000	540.000000000000000	7722	1502809984.0000000	194614.0000000	1297390.0000000	32245500.0000000	34.3056984
25	26	485.000000000000000	490.000000000000000	1725	814731008.0000000	472308.0000000	1633720.0000000	24117400.0000000	9.2979498
26	27	122.000000000000000	206.000000000000000	22857	276679008.0000000	12104.7998047	46818.8007813	1266340.0000000	92.4297028
27	28	206.000000000000000	133.000000000000000	7360	172992000.0000000	23504.4003906	97911.7968750	904980.0000000	32.3834000
28	29	133.000000000000000	9.000000000000000	19786	284012000.0000000	14354.2001953	67740.0000000	985626.0000000	80.2723999
29	30	9.000000000000000	1.000000000000000	4868	30021000.0000000	6167.0000000	13526.0996094	116747.0000000	20.1110001
30	31	549.000000000000000	638.000000000000000	24058	553841984.0000000	23021.0996094	118902.0000000	3777800.0000000	97.4465027
31	32	704.000000000000000	684.000000000000000	2963	3703470080.0000000	1249910.0000000	9940830.0000000	172810000.0000000	12.3456001

Figura 5.50. (A) Red de movilidad de la región de Marmárica, incluyendo la creación de nodos en los puntos de inicio y final de cada tramo de ruta. (B) Atributos asociados a la red, donde se identifican los nodos junto a una serie de métricas, que incluyen el área (*Area*), longitud (*Length*), suma (*Sum*), media (*Mean*), desviación estándar (*Standard Deviation*) y rango (*Range*), que permiten un análisis detallado de las características estructurales y funcionales de la red.

Una vez completados estos procedimientos, se realizó el análisis exploratorio de las redes de Marmárica, empleando un enfoque similar al utilizado en el estudio de caso anterior, basado en dos aproximaciones independientes pero complementarias. La primera consistió en analizar la red en su conjunto, prestando especial atención al papel de cada ruta en la estructura y el comportamiento general de la red. Para este análisis, se utilizó el paquete de aplicaciones sDNA (*Spatial Design Network Analysis*), el cual ha demostrado ser fundamental para comprender las dinámicas subyacentes en estas redes de movilidad, ya que permite un análisis detallado de estas estructuras, destacando el papel de cada segmento en términos de conectividad. Esto ha permitido cuantificar variables como la accesibilidad, la centralidad y la eficiencia de cada tramo, proporcionando una perspectiva más integral y completa a esta investigación.

Algunas de las métricas obtenidas a partir de estas aproximaciones, como el grado de centralidad, intermediación y cercanía, han sido claves para comprender el papel desempeñado por determinadas rutas (Figuras 5.51 y 5.52). De hecho, el análisis combinado de estas métricas ha proporcionado una visión clara de la funcionalidad y eficiencia de las vías de comunicación, destacando cómo la movilidad y la conectividad regional pudieron influir directamente en la estructura social, cultural, política y/o económica de estas comunidades. Este análisis ha permitido, además, identificar áreas estratégicas que funcionaron como puntos de conexión o canales de interacción, consolidando patrones y dinámicas que estructuraron el paisaje y desempeñaron un papel crucial en la cohesión y desarrollo de estas sociedades.

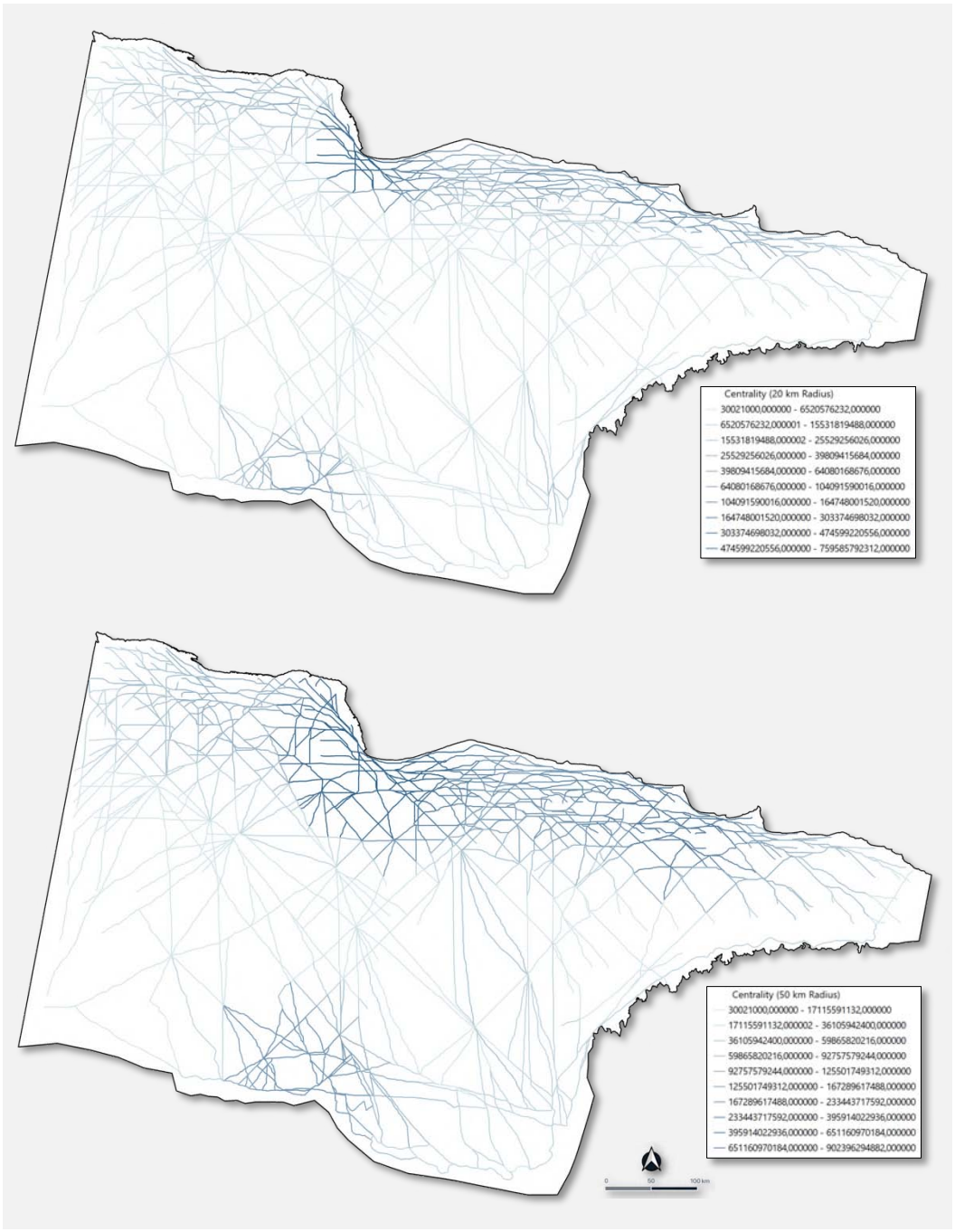


Figura 5.51. Análisis del grado de centralidad (*degree centrality*) con radios de 20 km (arriba) y 50 km (*abajo*). La centralidad se ha evaluado en función de la fortaleza de las conexiones, tomando como referencia la suma de los valores de acumulación. Los resultados muestran una conectividad significativa en las zonas más septentrionales cercanas a la costa, especialmente en torno a la Bahía de Sollum, Sidi Barrani, El Daba, y Marsa Matruh, mientras que en la parte meridional, en los márgenes del desierto de Libia también se observa un alto grado de centralidad en torno a los oasis de Al-Jaghbub y Siwa.

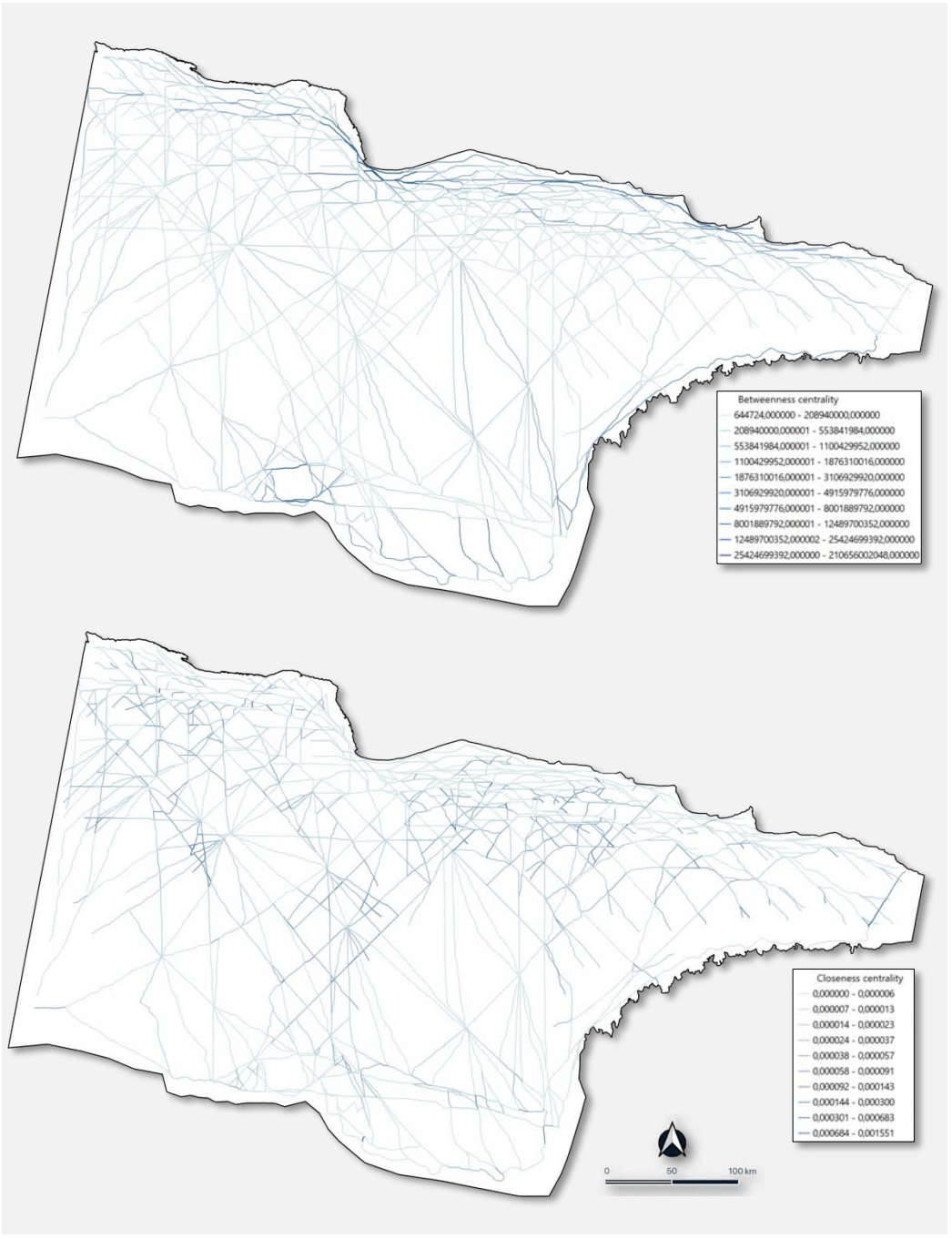


Figura 5.52. (*Arriba*) Análisis del grado de intermediación (*betweenness centrality*). (Abajo) grado de cercanía (*closeness centrality*), ambos aplicados a un radio de 20 km. En ambas representaciones, se observa la red completa de Marmárica, destacando los corredores estratégicos que facilitan la intermediación en las rutas (alta centralidad en intermediación) y aquellos que optimizan la movilidad directa (alta centralidad en cercanía).

La segunda aproximación consistió en profundizar en las propiedades estructurales de la red de Marmárica, representando los datos como datos de red (nodos y enlaces) para explorar las relaciones e interacciones entre puntos clave y sus conexiones. Este enfoque permitió aplicar diversas configuraciones para visualizar estas redes y evaluar la centralidad de enlaces y nodos que desempeñan un papel estratégico en la conectividad regional. En este sentido, esta conectividad se evaluó considerando aspectos como la densidad (proporción de conexiones existentes), la fragmentación (grado de desconexión entre subconjuntos de nodos) y los componentes conectados, lo cual facilitó la identificación de los nodos y enlaces más interconectados dentro de la red.

De este modo, este análisis ha permitido examinar el funcionamiento general de la red, definir el papel de ciertas entidades en términos de conectividad y evaluar el impacto de la eliminación de nodos y enlaces estratégicos en las dinámicas de movilidad. Además, dado que la disposición geográfica de estos elementos puede dificultar en ocasiones la interpretación de patrones de conexión significativos debido a restricciones espaciales, el uso de estas aproximaciones ha permitido desvincular los nodos de su posición geográfica, facilitando una reorganización de la red para resaltar patrones de conectividad, enlaces clave y/o la fortaleza de las conexiones. A continuación, se presentan algunos de los resultados más relevantes en relación con la conectividad y accesibilidad mostrados tras el análisis de la red regional de Marmárica (Figuras 5.53 a 5.55).

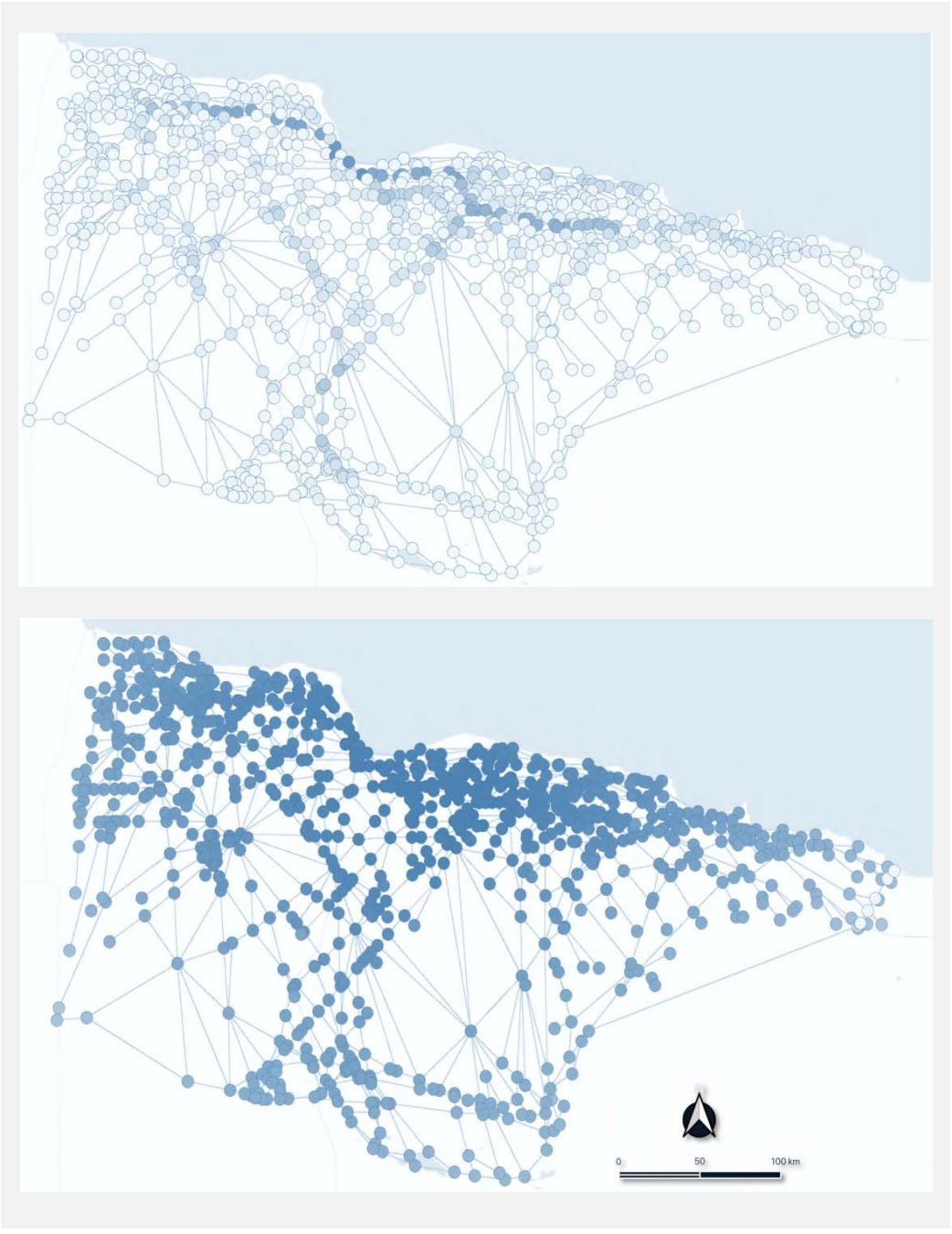


Figura 5.53. Representación de la red de movilidad en la región de Marmárica mediante nodos y enlaces. (*Arriba*) Los nodos están representados según su grado de intermediación, mostrando valores más altos a lo largo de la costa y en las conexiones centrales hacia los oasis del interior, lo que indica su papel clave en la conectividad de la red. (*Abajo*) Los nodos se muestran de acuerdo con su grado de cercanía, donde los valores más altos se concentran a lo largo de la zona-central costera, reflejando una mayor accesibilidad en estas áreas.

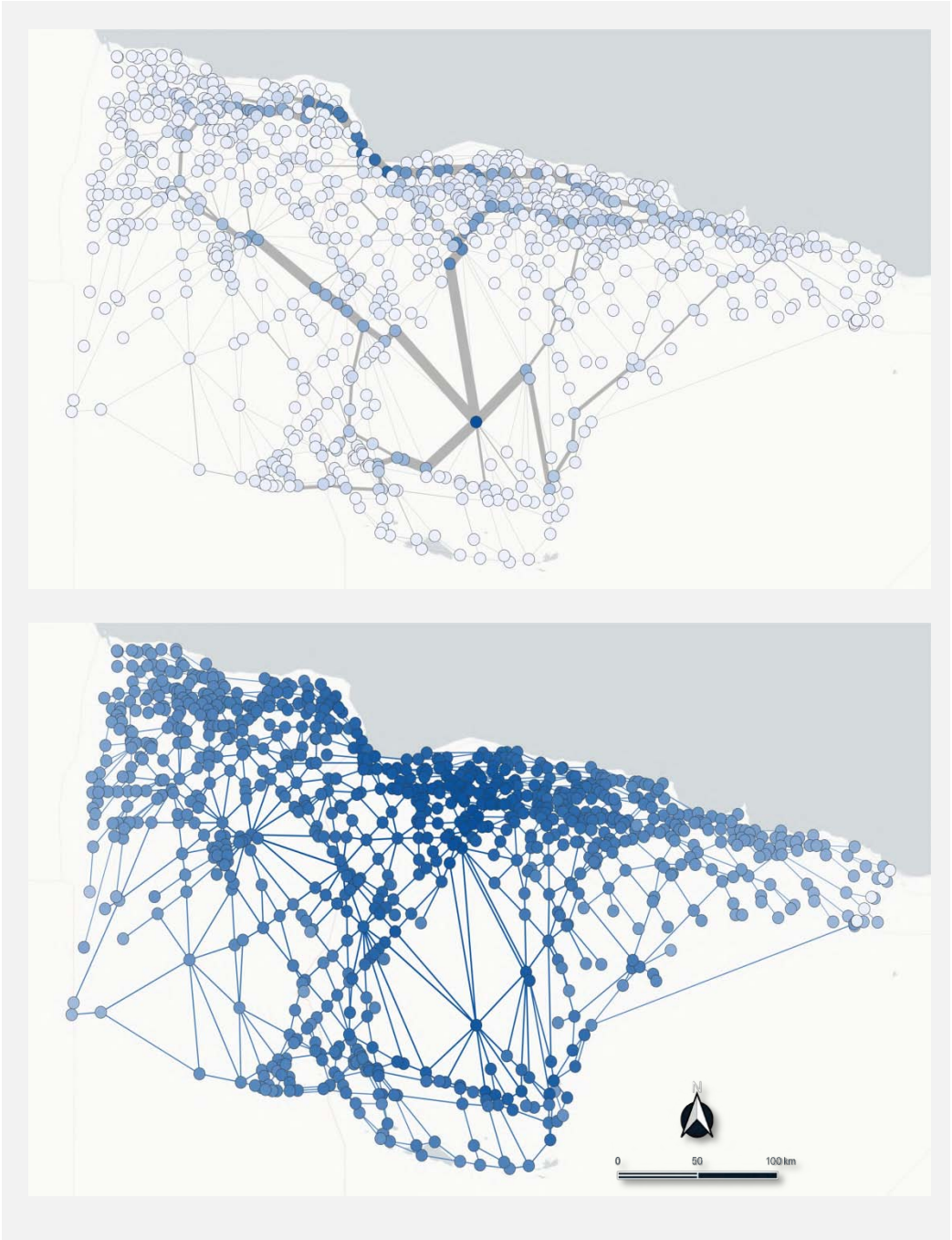


Figura 5.54. Representación de la red de movilidad en la región de Marmárica, centrada ahora en el análisis de las conexiones (enlaces). (*Arriba*) Los enlaces están representados según su grado de intermediación, destacando los enlaces clave que conectan la costa con los oasis del interior. (*Abajo*) Los enlaces se muestran de acuerdo con su grado de cercanía, reflejando los valores más altos en la zona central costera que conecta hacia los oasis del interior, lo que revela las conexiones clave para la accesibilidad en la región.

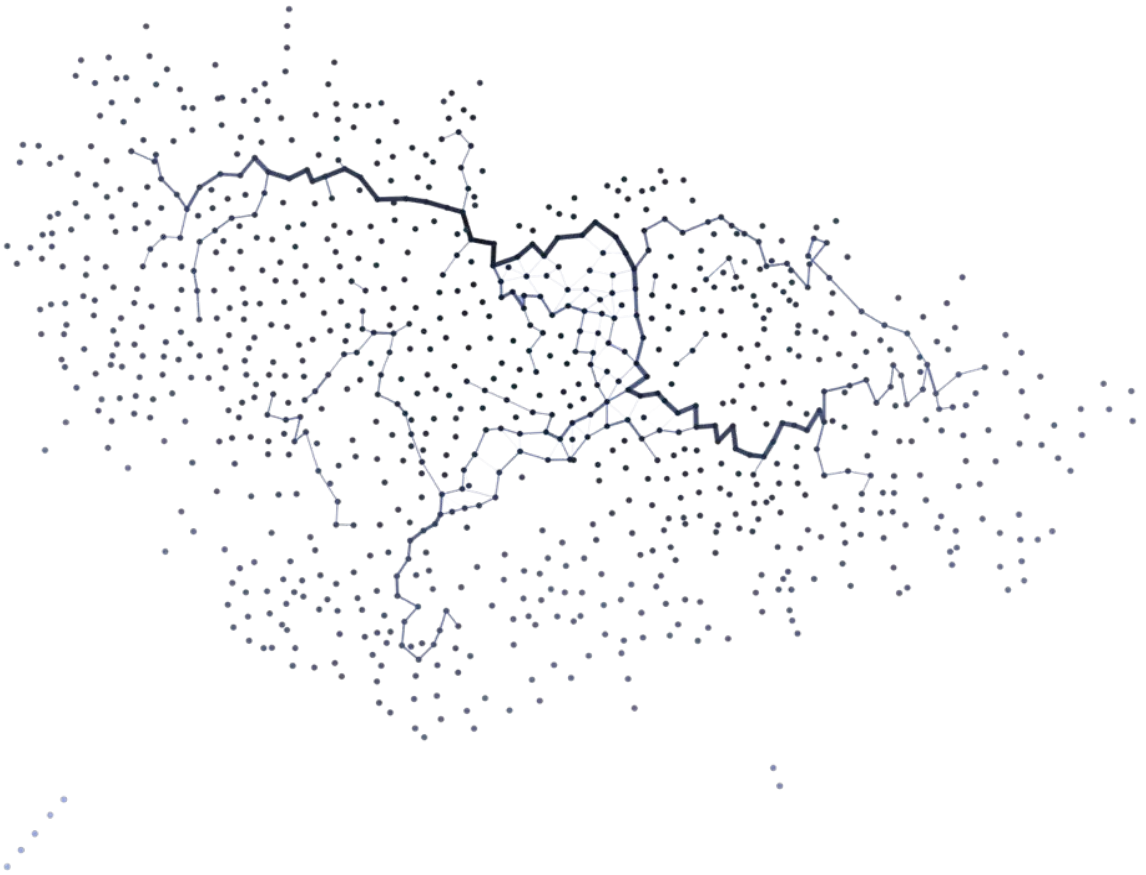


Figura 5.55. Representación de la red de movilidad de la región de Marmárica (NE-Libia/NO-Egipto); los nodos (en color azul) han sido liberados de su posición geográfica, lo que permite visualizar su posición en función de la fortaleza de sus conexiones.

Tras el análisis exploratorio de las redes en Marmárica y siguiendo la misma metodología aplicada en el estudio de caso anterior, se procedió a la representación explícita de las relaciones y dinámicas de interacción mediante distintos modelos de redes espaciales. Estos modelos fueron aplicados a los patrones de localización y distribución de los antiguos asentamientos documentados en esta investigación, permitiendo analizar las interacciones a diversas escalas espaciales y temporales. Específicamente, los periodos cronológicos considerados incluyen: Bronce Final (LBA), inicio de la Edad del Hierro (EIA), Periodo Arcaico (ARC), Clásico (CLA), Helenístico (HEL) y Romano (ROM). Además, para cada uno de estos modelos, se registraron una serie de métricas de red con el objetivo de analizar la estructura y conectividad entre los asentamientos a distintos niveles y escalas de análisis. Las métricas evaluadas incluyen: (i) el número de nodos conectados (*Nodes*); (ii) el número de enlaces (*Edges*); (iii) el grado promedio (*Average Degree*); y (iv) la densidad de la red (*Density*).

En primer lugar, se presentan los modelos de redes espaciales que emplean la distancia euclidiana como criterio para establecer relaciones de proximidad entre los asentamientos. Entre estos modelos, se analizan las redes basadas en el cálculo de vecinos más cercanos (*K-Nearest Neighbors Networks*, K-NN), para los cuales se emplearon los mismos parámetros que en el estudio de caso anterior, —i.e., valores de $k = 1, 2, 4$ y 10— para cada una de las seis ventanas cronológicas consideradas.

Este enfoque ha facilitado la identificación de los asentamientos que establecen vínculos directos con sus vecinos más cercanos en cada periodo, proporcionando una base cuantitativa para comparar la evolución de las redes socioespaciales a diferentes escalas y a largo plazo (Figuras 5.56 a 5.61 y

Tabla 5.5). Esto ha permitido identificar distintas dinámicas y procesos, capturando tanto interacciones cercanas como redes más amplias. Para ello, los umbrales más bajos (k = 1 y 2) se enfocan en las relaciones inmediatas, reflejando redes de interacción localizadas, mientras que los más elevados (k = 4 y 10) muestran cómo se expande la conectividad regional y los posibles vínculos entre asentamientos más distantes.

Bronce Final (LBA): Durante el Bronce Final, la red de asentamientos en Marmárica, aunque compuesta por un número reducido de nodos conectados (17), revela una alta interrelación regional al considerar valores más elevados de k, como k = 10, alcanzando una densidad de 0.7941. Esto sugiere que los asentamientos mantenían una fuerte interconexión en el ámbito regional, con casi el 80% de las posibles relaciones establecidas. El grado promedio de 12.705 y la elevada densidad respaldan esta tendencia. En contraste, con los valores menores de k (k = 1 y k = 2), donde la conectividad se reduce considerablemente, ya que solo una pequeña fracción de los asentamientos está conectada mediante enlaces más próximos (12 para k = 1 y 23 para k = 2). Esto indica que, si bien las conexiones cercanas eran significativas, los asentamientos dependían de relaciones más distantes, probablemente facilitadas por la red regional. Con valores intermedios (k = 4), la densidad incrementa (0.3308), reforzando la idea de una red integrada durante el LBA, en la que las interacciones no se limitaban a los vecinos más próximos, sino que abarcaban una red de intercambio más amplia, posiblemente impulsada por el intercambio regional (Figura 5.56 y Tabla 5.5).

Inicio de la Edad del Hierro (EIA): Durante el EIA, la red de asentamientos conectados, aunque más reducida (14 asentamientos), presenta una densidad notablemente alta para k = 10 (0.9230), lo que refleja una estructura con una

fuerte interconexión a nivel regional. Esto evidencia una considerable interdependencia entre los asentamientos, a pesar del menor número de nodos conectados (asentamientos). El grado promedio de 12.0 para k = 10 también sugiere que las interacciones eran frecuentes, reforzando la cohesión regional. Incluso con valores más bajos de k, la densidad se mantiene significativa; por ejemplo, con k = 2, la densidad alcanza 0.2087, lo cual indica que las conexiones locales inmediatas continuaban siendo relevantes. Esta persistente conectividad regional evidenciada en todos los valores de k sugiere que, a pesar del menor número de asentamientos, la red permanecía altamente interconectada (Figura 5.57 y Tabla 5.5).

Periodo Arcaico (ARC): En el periodo Arcaico, la red experimenta un leve crecimiento en tamaño, con 18 asentamientos conectados, manteniendo una alta densidad para k = 10 (0.7581), aunque ligeramente inferior a la observada durante el EIA. Este nivel de interconexión sugiere que, aunque los asentamientos permanecían bien integrados, con un alto grado promedio de 12.888 para k = 10, comenzó a evidenciarse una mayor dispersión en las conexiones, lo que apunta a una ligera redistribución en la intensidad de las interacciones. La progresiva disminución de la densidad podría asociarse con un proceso de fragmentación. Esta idea se basa en que, en niveles de k más bajos, como k = 1, la red muestra una configuración dispersa, con una densidad de solo 0.0849, lo cual implica que dependía menos de las conexiones locales inmediatas y más de la red regional más amplia (Figura 5.58 y Tabla 5.5).

Periodo Clásico (CLA): El periodo Clásico muestra un incremento en el número de nodos, con 20 asentamientos conectados. Aunque la red para k = 10 mantiene un grado promedio elevado (12.8), la densidad disminuye a

0.6736, lo cual sugiere una interconexión regional más dispersa. A pesar de esta reducción, el alto grado promedio indica que las conexiones entre asentamientos permanecían siendo significativas. Esto podría reflejar la consolidación de centros urbanos que monopolizaban las relaciones, mientras que los asentamientos más alejados quedaban en posiciones más marginales. En niveles inferiores de *k*, la densidad sigue disminuyendo, alcanzando un valor de 0.2578 en $k = 4$, lo que sugiere que las comunidades locales comenzaron a perder cohesión y que las interacciones locales ya no eran tan relevantes como en periodos previos. En consecuencia, la expansión territorial observada en esta fase podría haber diluido las relaciones más intensas entre asentamientos cercanos, evidenciando una posible reconfiguración de las rutas de interacción o el surgimiento de nuevas dinámicas territoriales (Figura 5.59 y Tabla 5.5).

Periodo Helenístico (HEL): El periodo Helenístico se caracteriza por un incremento notable en el número de asentamientos conectados (36 nodos); sin embargo, a pesar de este crecimiento, la densidad en $k = 10$ disminuye considerablemente (0.3365), indicando una red más dispersa. Aunque el grado promedio de 11.777 permanece alto, la reducción de la densidad para $k = 4$ (0.1428) y $k = 2$ (0.0714) evidencia una dispersión significativa. Esta fragmentación progresiva sugiere que, aunque seguía existiendo una red regional con una fuerte conectividad, ya no mostraba la misma cohesión posiblemente por el incremento o expansión de las redes conectando a más asentamientos distantes (Figura 5.60 y Tabla 5.5).

Periodo Romano (ROM): Durante el periodo Romano, el número de asentamientos aumenta exponencialmente, alcanzando 67 nodos conectados; sin embargo, la densidad de la red para $k = 10$ desciende drásticamente a

0.1795, lo que sugiere una expansión territorial significativa acompañada de una red más dispersa y menos concentrada. Aunque el grado promedio se mantiene relativamente alto en 11.850, la red en niveles inferiores de *k* muestra una densidad aún menor, alcanzando solo 0.0212 en $k = 1$. Esta dispersión podría estar asociada a la inclusión de asentamientos más periféricos o control romano de áreas más extensas, lo que diluyó la intensidad de las interacciones entre los nodos principales. Por lo tanto, a medida que la red se expandía territorialmente, se integraban más asentamientos (Figura 5.61 y Tabla 5.5).

En términos generales, en prácticamente todos los periodos analizados, el número de asentamientos conectados tiende a incrementarse, aunque este aumento no siempre implica una mayor densidad en las redes. De hecho, estas se vuelven más dispersas a medida que se integran más asentamientos, especialmente en los periodos Helenístico y Romano, lo cual sugiere que las comunidades no dependían exclusivamente de los asentamientos cercanos, sino de redes de interacción más amplias. Este fenómeno refleja un claro proceso de expansión territorial, donde la densidad disminuye progresivamente a lo largo del tiempo, mostrando una tendencia posiblemente hacia la descentralización de las relaciones, sobre todo en los periodos más tardíos. Sin embargo, en todos los periodos analizados, tanto la densidad como el grado promedio aumentan conforme se incrementa el valor de *k*, lo que indica una mayor interconexión entre asentamientos cuando se amplía el rango de vecinos considerados. En contraste, los valores bajos de *k* muestran interacciones locales y próximas que parecen no ser tan significativas en comparación con las observadas en los valores superiores, los cuales revelan redes más extensas que habrían ayudado a mantener la cohesión territorial.

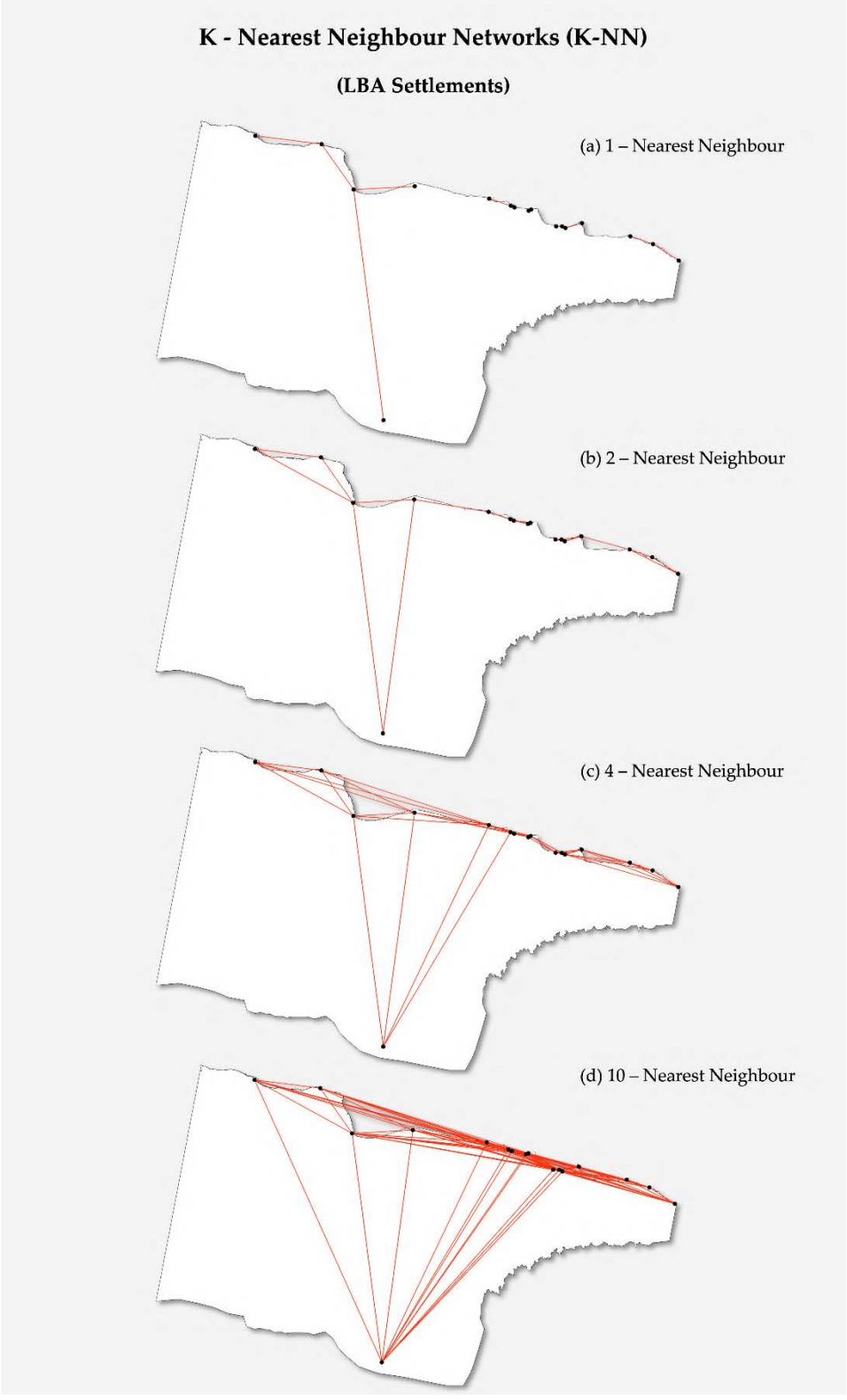


Figura 5.56. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del Bronce Final.

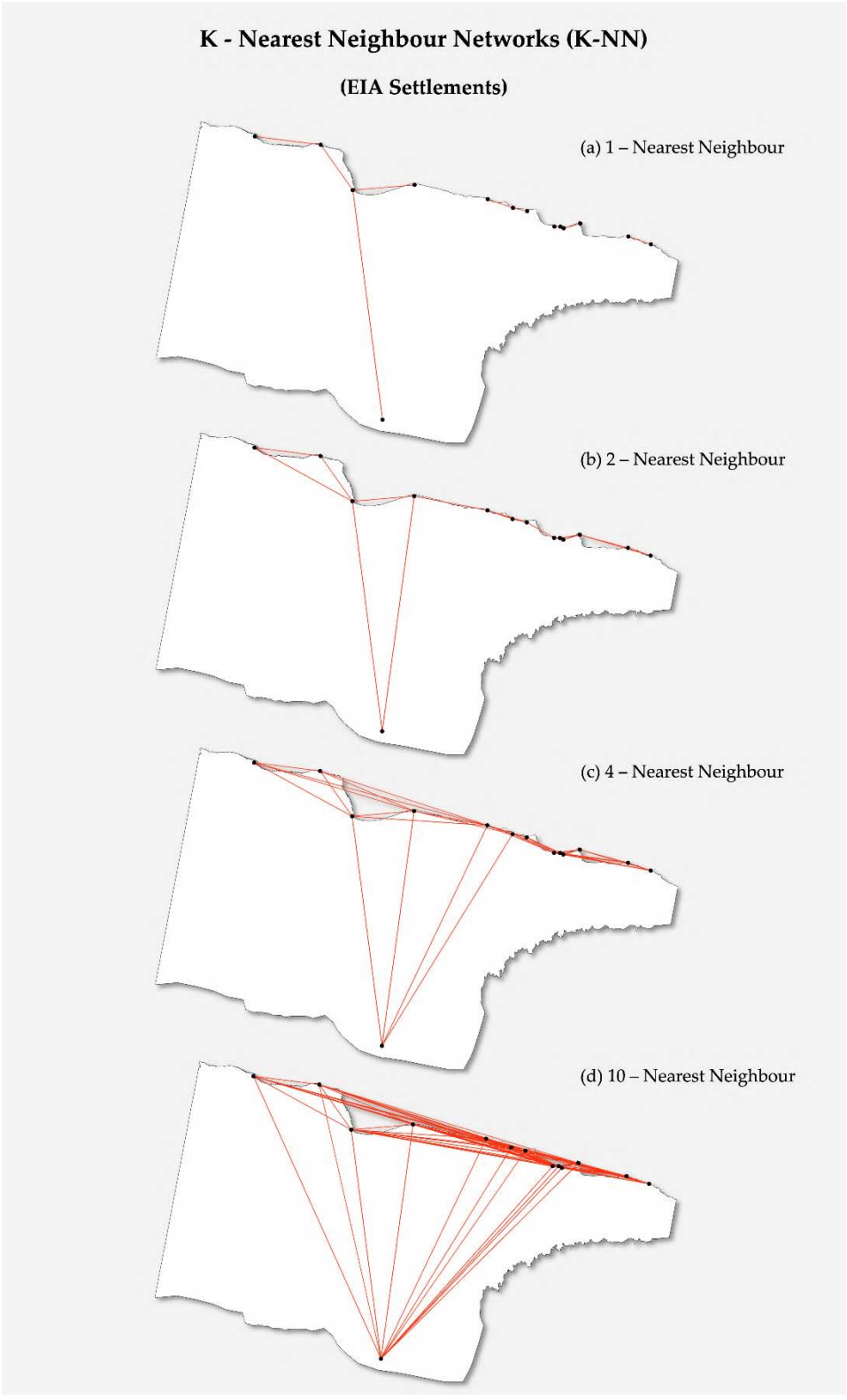


Figura 5.57. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del inicio de la Edad del Hierro.

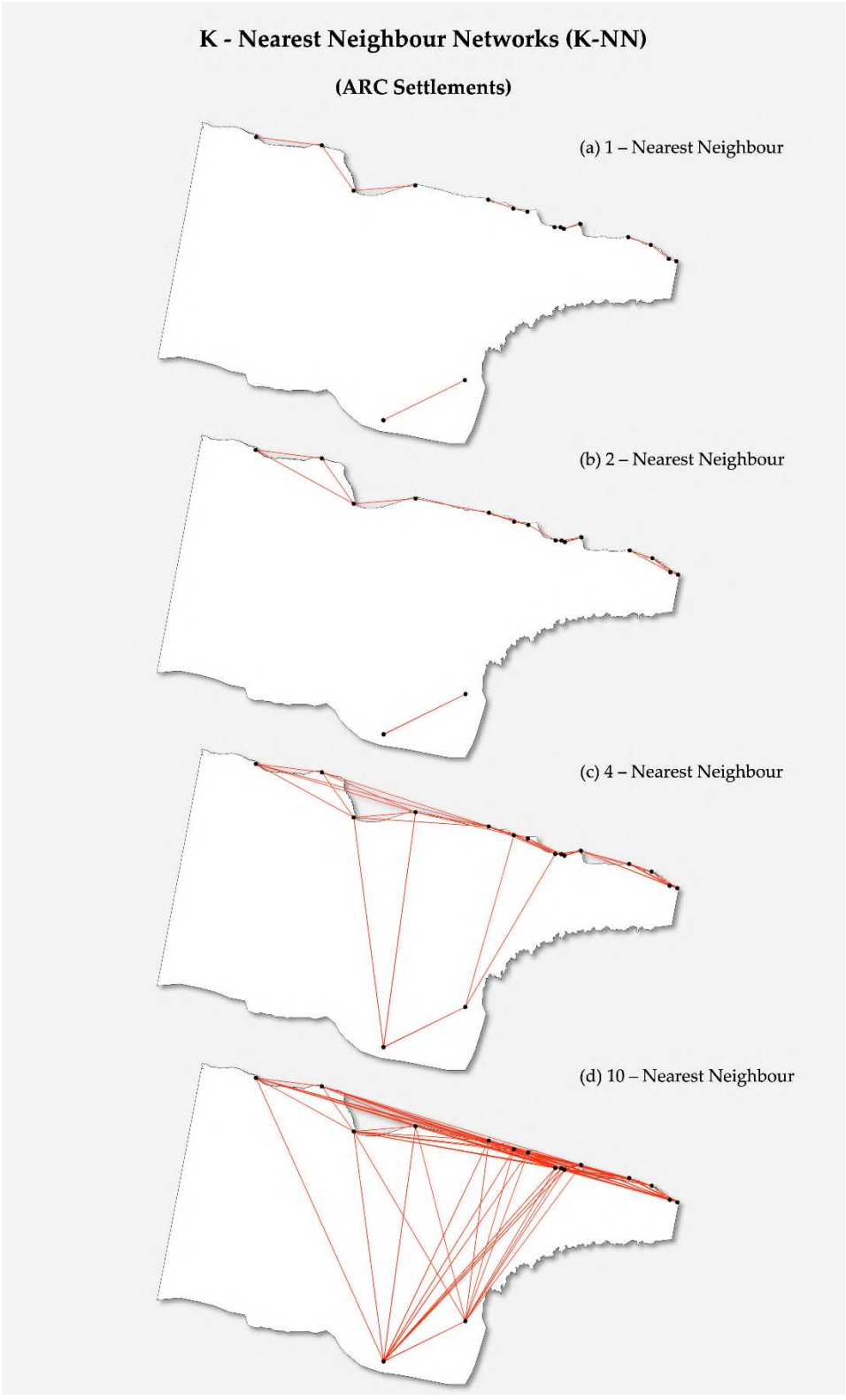


Figura 5.58. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del periodo Arcaico.

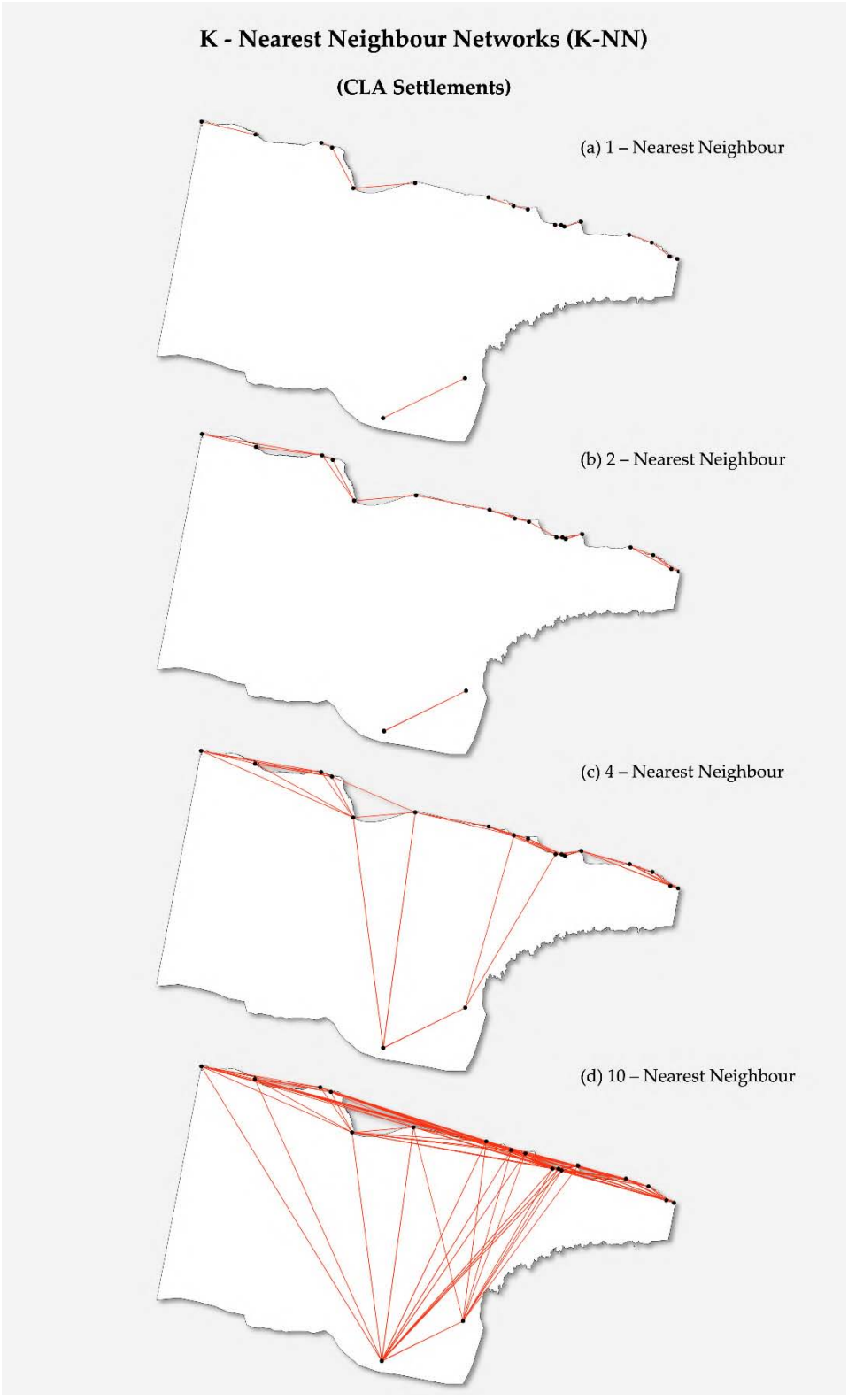


Figura 5.59. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del periodo Clásico.

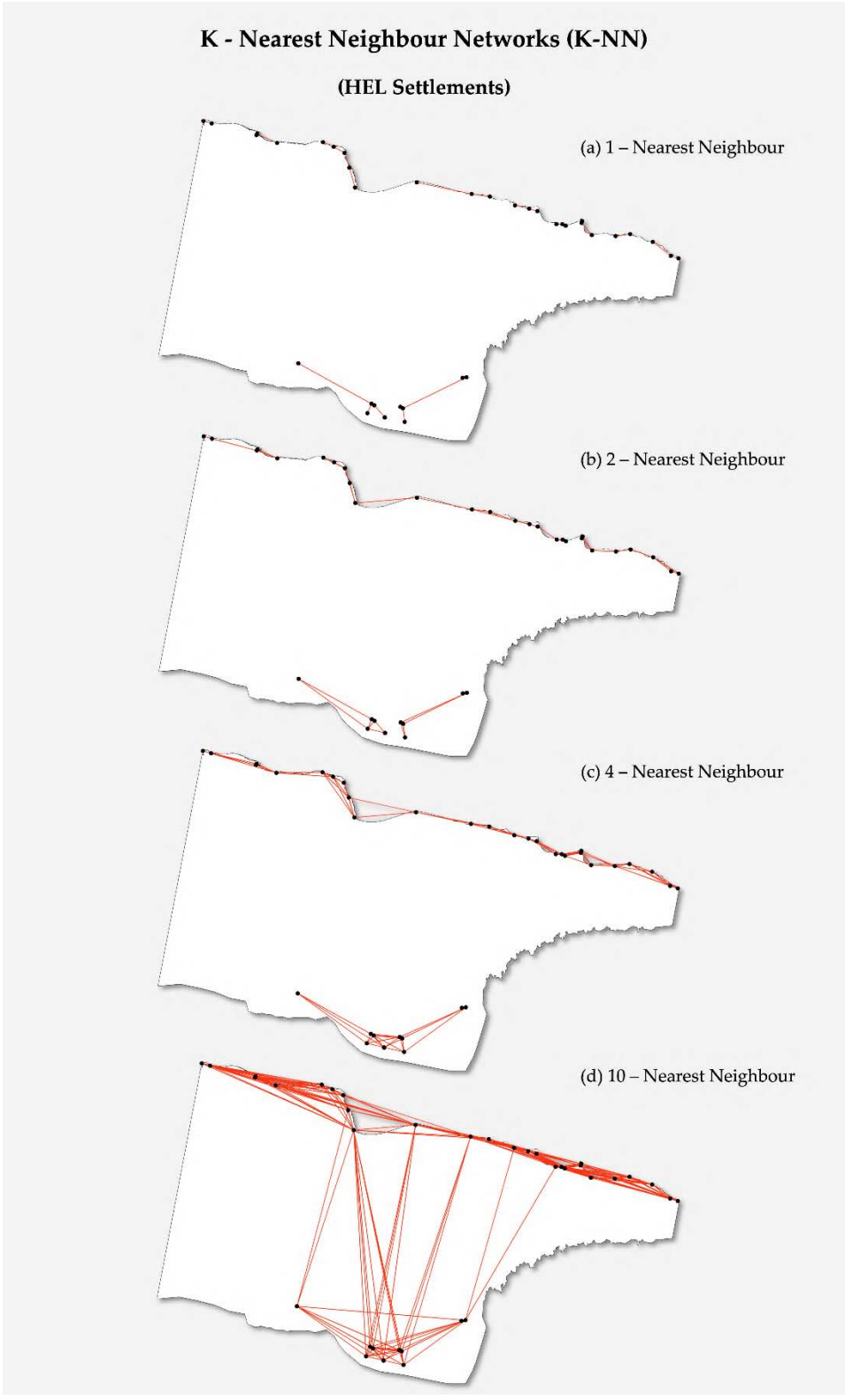


Figura 5.60. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del periodo Helenístico.

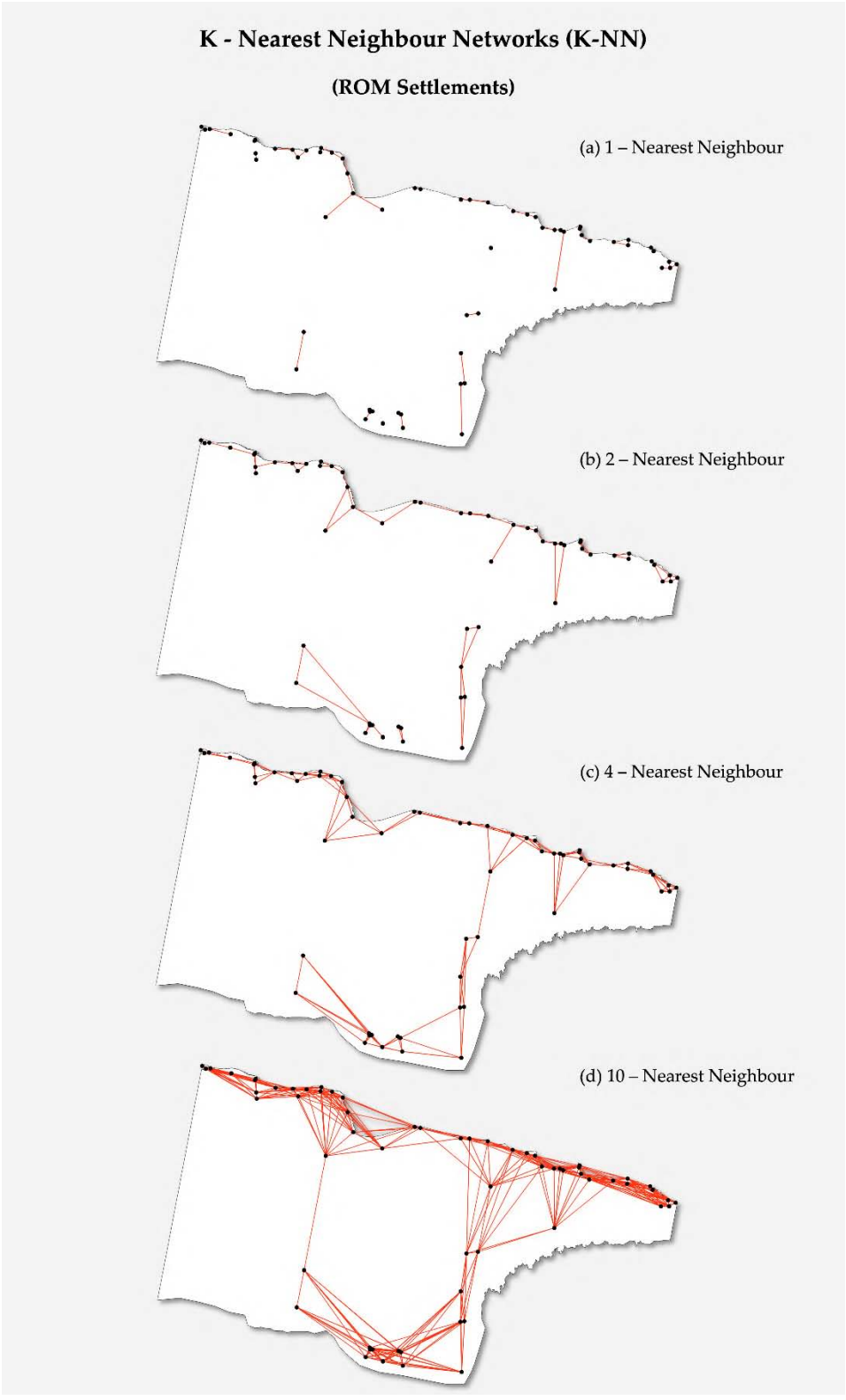


Figura 5.61. Modelo de red K-NN aplicado a los asentamientos del periodo Romano.

Tabla 5.5. Resultados por periodo tras aplicar el modelo K-NN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad.

Temporalities	Nodes (Settlements)	K-NN Level	Edges	Average Degree	Density
LBA	17	10-NN	108	12.705	0.7941
		4-NN	45	5.294	0.3308
		2-NN	23	2.705	0.1691
		1-NN	12	1.411	0.0882
EIA	14	10-NN	84	12.0	0.9230
		4-NN	37	5.285	0.4065
		2-NN	19	2.714	0.2087
		1-NN	10	1.428	0.1098
ARC	18	10-NN	116	12.888	0.7581
		4-NN	45	5.0	0.2941
		2-NN	22	2.444	0.1437
		1-NN	13	1.444	0.0849
CLA	20	10-NN	128	12.8	0.6736
		4-NN	49	4.9	0.2578
		2-NN	25	2.5	0.1315
		1-NN	14	1.4	0.0736
HEL	36	10-NN	212	11.777	0.3365
		4-NN	90	5.0	0.1428
		2-NN	45	2.5	0.0714
		1-NN	25	1.388	0.0396
ROM	67	10-NN	397	11.850	0.1795
		4-NN	165	4.925	0.0746
		2-NN	86	2.567	0.0388
		1-NN	47	1.402	0.0212

El segundo modelo empleado en el análisis se basa en la creación de redes de distancia máxima (*Maximum Distance Networks*, MDN), el cual complementa el modelo de vecinos más cercanos (K-NN) previamente analizado. Al capturar interacciones entre antiguos asentamientos de Marmárica que se encuentran a una distancia menor o igual a diversos umbrales predefinidos, el modelo permite identificar conexiones entre asentamientos a diferentes escalas espaciales, desde lo local hasta lo global, y mostrar cómo estas interacciones varían según el rango de distancia seleccionado (Figuras 5.62 a 5.67 y Tabla 5.6).

Estos umbrales o escalas de análisis fueron adaptadas específicamente a las características geográficas de la región de Marmárica, estableciéndose en los siguientes niveles:

1. **Escala Local** (*Local Range*) (5 km ≤ distancia ≤ 20 km): Representa interacciones locales entre asentamientos cercanos, reflejando movimientos de personas y bienes a pequeña escala.
2. **Escala Regional Próxima** (*Immediate Regional*) (20 km < distancia ≤ 150 km): Incluye rutas y conexiones entre asentamientos a media distancia dentro de la región de Marmárica.
3. **Escala Regional Ampliada** (*Wider Regional*) (150 km < distancia ≤ 300 km): Refleja conexiones de larga distancia que implican asentamientos clave y rutas de transporte estratégicas.
4. **Extensión Máxima** (*Maximum Extent*) (≤ 500 km): Captura interacciones que abarcan la totalidad de la región de Marmárica, extendiéndose hacia territorios vecinos como Egipto y la Cirenaica, y conectando con rutas trans-saharianas y marítimas del Mediterráneo.

A continuación, se ofrece una evaluación de los resultados obtenidos para cada escala y periodo histórico, destacando las principales métricas de red obtenidas, como el número de nodos, el número de enlaces, el grado promedio y la densidad. Estos indicadores han sido fundamentales para comprender la evolución de la conectividad regional y el impacto de la escala en las interacciones socioespaciales entre los antiguos asentamientos de Marmárica.

Bronce Final (LBA): Durante el Bronce Final, la red evidencia una progresión clara en la conectividad conforme se amplían los umbrales de distancia. A nivel local, aunque solo 8 nodos (asentamientos) están conectados, la densidad es relativamente alta (0.2142), lo cual sugiere que, a pesar del tamaño de la red, las comunidades dependían de interacciones cercanas, reflejando una mayor cohesión interna en conjuntos de asentamientos más próximos. Al expandir el análisis a escalas regionales, se observa una estructura más cohesionada. En particular, en los niveles regional y máximo, la red abarca casi todos los asentamientos, con un incremento en el grado promedio de 1.5 a 1.882 y una densidad que llega a 0.1176 en el nivel máximo. Esto implica que, a escalas superiores, las conexiones dentro de la red se intensifican. Así, aunque las redes locales resultaban esenciales, las interacciones a escalas mayores presentan una cohesión significativa, indicando que los asentamientos en Marmárica dependían mayoritariamente de conexiones a media y larga distancia para sostener sus relaciones y mantener la cohesión territorial (Figura 5.62 y Tabla 5.6).

Inicio de la Edad del Hierro (EIA): El EIA muestra un patrón similar al LBA, aunque el número de asentamientos es menor (solo 6 nodos conectados y 4 enlaces), la densidad local es bastante alta (0.2666), lo cual sugiere que las

interacciones cercanas eran aún más intensas que en el periodo anterior. Esto refuerza la idea de que, durante este periodo, marcado quizás por una mayor inestabilidad o fragmentación política, los asentamientos dependían mayormente de vínculos locales para mantener su cohesión. Sin embargo, a medida que aumentan los umbrales de distancia, la red adquiere mayor densidad, alcanzando un grado promedio de 1.857 y una densidad de 0.1428 en el nivel máximo. Esta progresión indica que la conectividad se incrementa conforme se consideran distancias más amplias, lo cual implica que las interacciones a larga distancia continuaban siendo fundamentales para la cohesión general de la red (Figura 5.63 y Tabla 5.6).

Periodo Arcaico (ARC): Durante el periodo Arcaico, la densidad local (0.1333) disminuye notablemente en comparación con los periodos anteriores y presenta un grado promedio igualmente bajo (1.2). Esta reducción sugiere que los asentamientos habrían comenzado a depender menos de las interacciones cercanas, reflejando un cambio hacia una estructura más dispersa, con conexiones que empiezan a establecerse a nivel regional. A escala regional, el número de enlaces continúa en aumento, aunque la densidad permanece relativamente baja (0.0849). Al llegar a la escala máxima, la densidad se incrementa a 0.1111, lo que revela una mayor interconectividad entre los asentamientos. En consecuencia, las redes regionales y máximas muestran un incremento significativo tanto en el grado promedio como en la densidad, reforzando la idea de una expansión en las redes y una organización territorial más compleja, donde las conexiones a larga distancia se volvieron esenciales para la cohesión de los asentamientos durante este periodo (Figura 5.64 y Tabla 5.6).

Periodo Clásico (CLA): Durante el periodo Clásico, en la escala local, la densidad (0.1060) y el grado promedio (1.166) muestran una disminución. Este comportamiento indica que las conexiones locales van perdiendo relevancia en favor de una red regional de mayor alcance. No obstante, al examinar las escalas superiores, se observa que la estructura de la red permanece relativamente cohesionada, aunque las densidades en los niveles regional y máximo siguen sin ser especialmente altas (0.0736 a 0.0947). Este patrón en la conectividad local podría reflejar una tendencia hacia redes más amplias, pero menos densas. Por tanto, este periodo revela una expansión territorial y la aparición de centros urbanos estratégicos que enlazaban asentamientos distantes. Las interacciones regionales, aunque más extendidas, presentan una menor intensidad, lo que sugiere una transición hacia una configuración territorial más dispersa (Figura 5.65 y Tabla 5.6).

Periodo Helenístico (HEL): El periodo Helenístico muestra un aumento en el número de asentamientos y, en consecuencia, una red más dispersa, especialmente a escala local. Esto se evidencia en la baja densidad local (0.0451), que refleja una pérdida de cohesión en las interacciones inmediatas. Un patrón similar se observa en los niveles regional y máximo; por ejemplo, en este último, la densidad es de 0.0497, lo que indica una red muy dispersa, a pesar del número relativamente alto de enlaces (35). Aunque las conexiones aumentan en las escalas regional y máxima, la densidad permanece baja, lo que podría deberse a una expansión territorial significativa con menor cohesión en las interacciones regionales. Esto posiblemente esté relacionado con el surgimiento de nuevas rutas comerciales o dinámicas que priorizaban ciertos centros o rutas, produciendo una mayor fragmentación en la red (Figura 5.66 y Tabla 5.6).

Periodo Romano (ROM): En el periodo Romano, la red sigue expandiéndose, con un número creciente de asentamientos y, en consecuencia, se observa una red más dispersa. La densidad sigue disminuyendo, alcanzando un mínimo de 0.0244 para el nivel local y solo 0.0284 para el nivel máximo. Esto refleja la amplia expansión territorial bajo el control romano, donde la inclusión de asentamientos periféricos redujo la intensidad de las interacciones entre los asentamientos centrales. En este sentido, la estructura dispersa de la red muestra que, aunque los asentamientos estaban conectados, no dependían tanto de interacciones a escalas menores. Este hecho se debe posiblemente a la infraestructura romana, que probablemente facilitó la conectividad entre asentamientos más distantes (Figura 5.67 y Tabla 5.6).

A lo largo de los distintos periodos analizados, el número de asentamientos conectados crece de manera significativa, evidenciando una progresiva expansión territorial. Por otro lado, los periodos más tempranos (LBA y EIA) muestran una clara conectividad local, con densidades superiores en comparación con las fases posteriores, pero que también depende de redes a escalas mayores para mantener la cohesión territorial. De hecho, esta intensidad de interacción en el ámbito local disminuye paulatinamente con el avance de los periodos, indicando una transición hacia redes más amplias y dispersas. Esto sugiere que los asentamientos dependían progresivamente menos de sus vecinos inmediatos para sostener las relaciones y más de conexiones regionales y de larga distancia. En los periodos más tardíos (HEL y ROM), la red se vuelve más dispersa y menos cohesionada, probablemente debido al incremento en el número de asentamientos conectados. Esta tendencia parece estar vinculada a un proceso de expansión territorial y a una reorganización de las interacciones, lo que refuerza la idea de una dependencia creciente en una infraestructura regional más amplia.

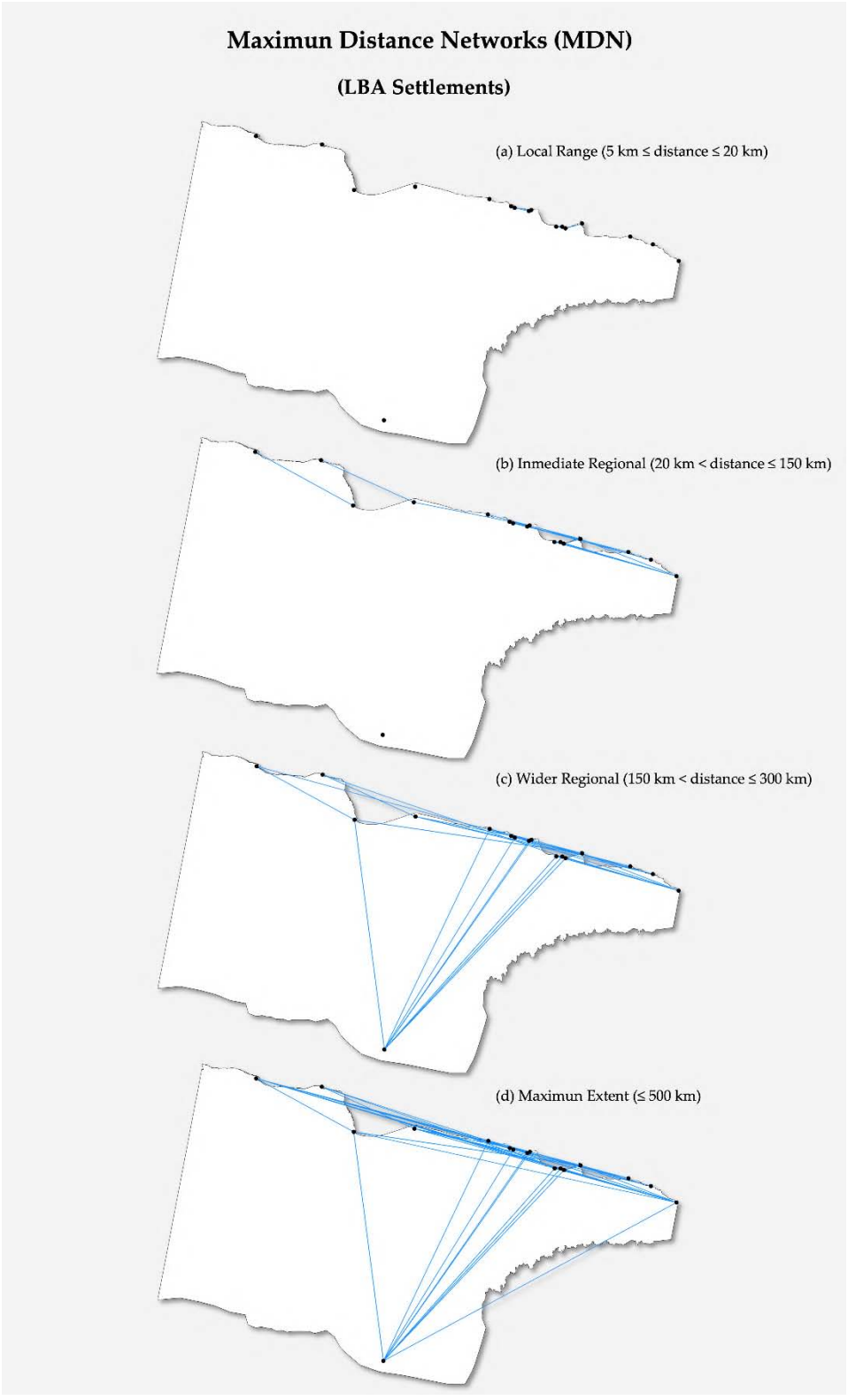


Figura 5.62. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del Bronce Final.

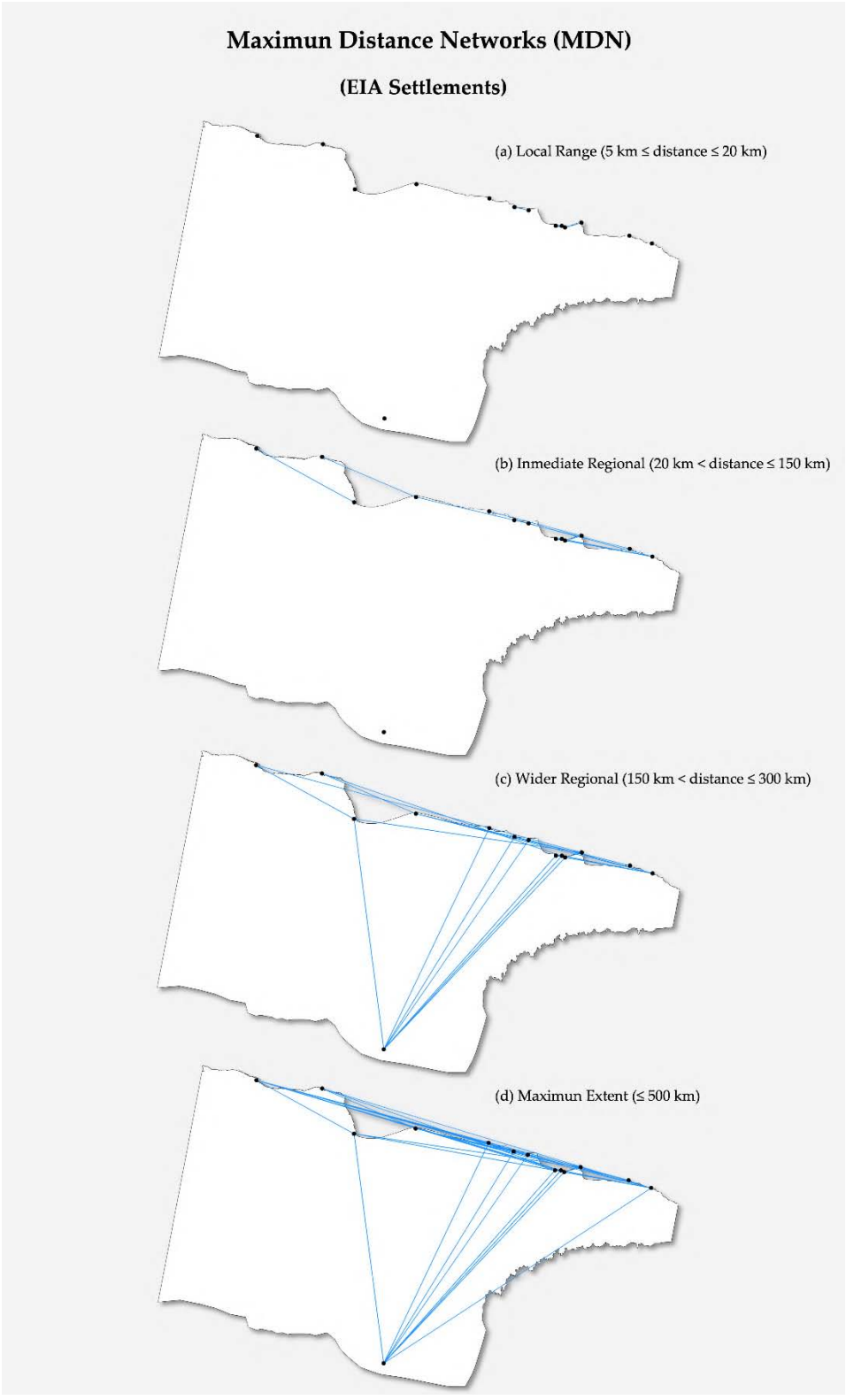


Figura 5.63. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del inicio de la Edad del Hierro.

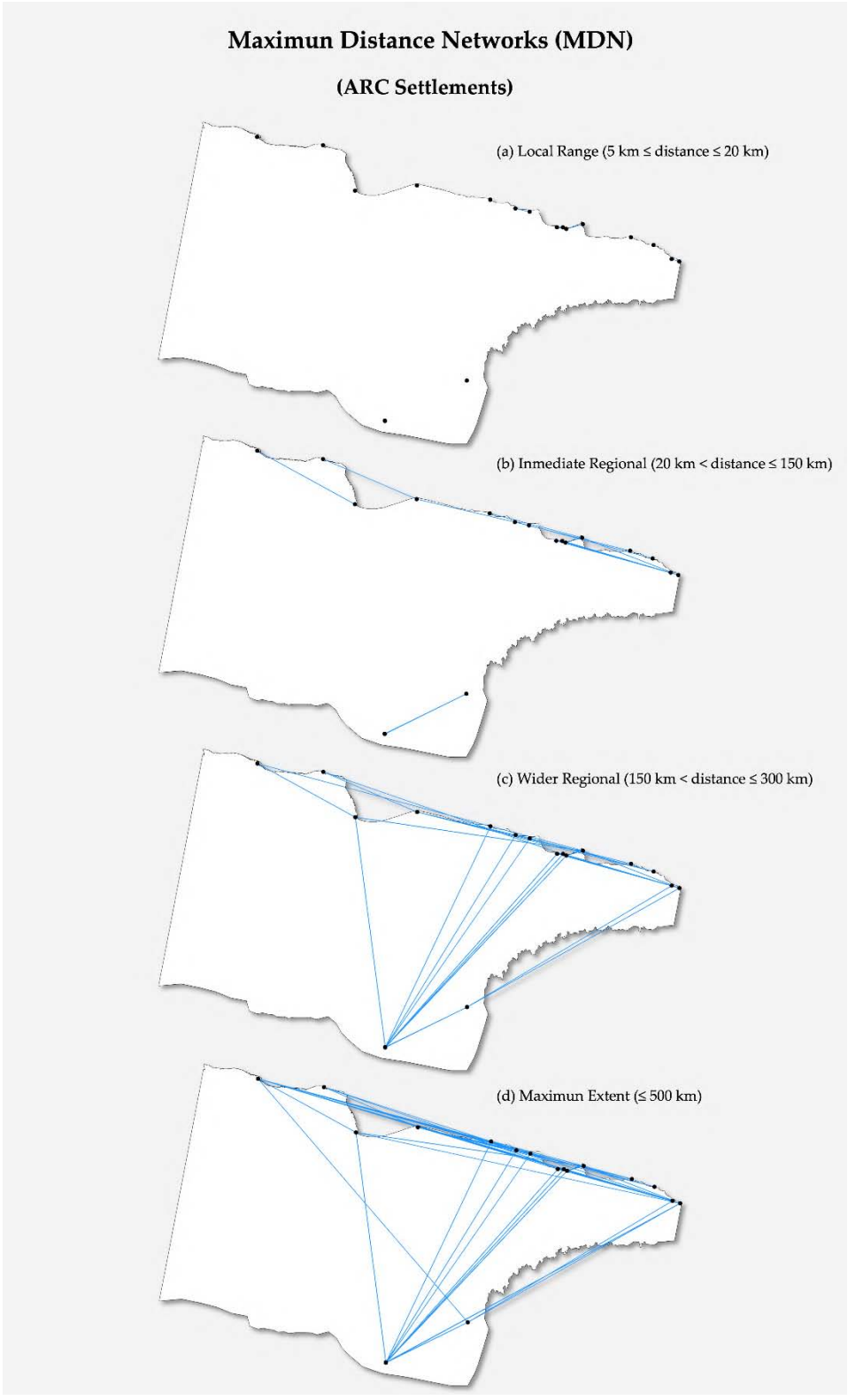


Figura 5.64. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del periodo Arcaico.

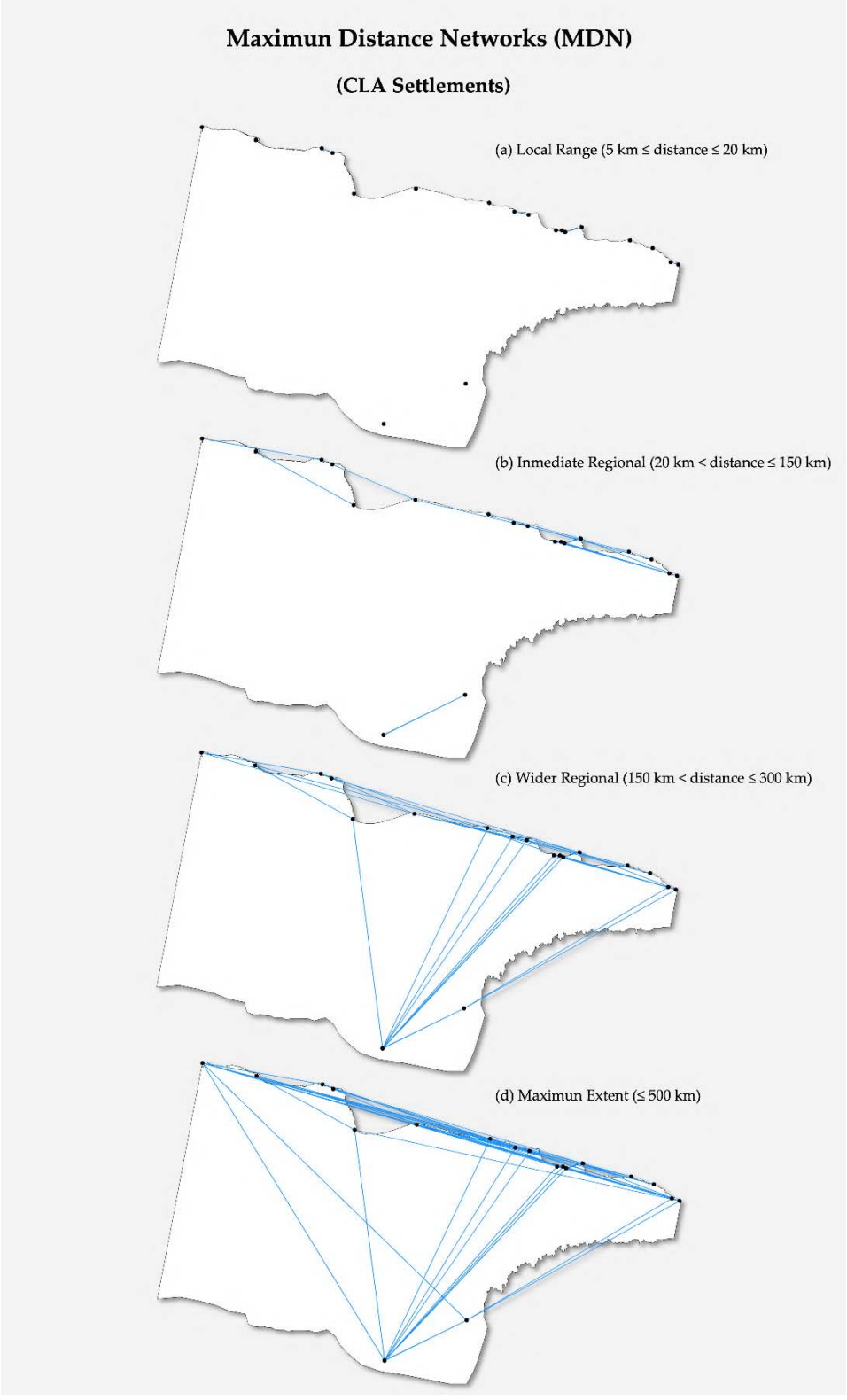


Figura 5.65. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del periodo Clásico.

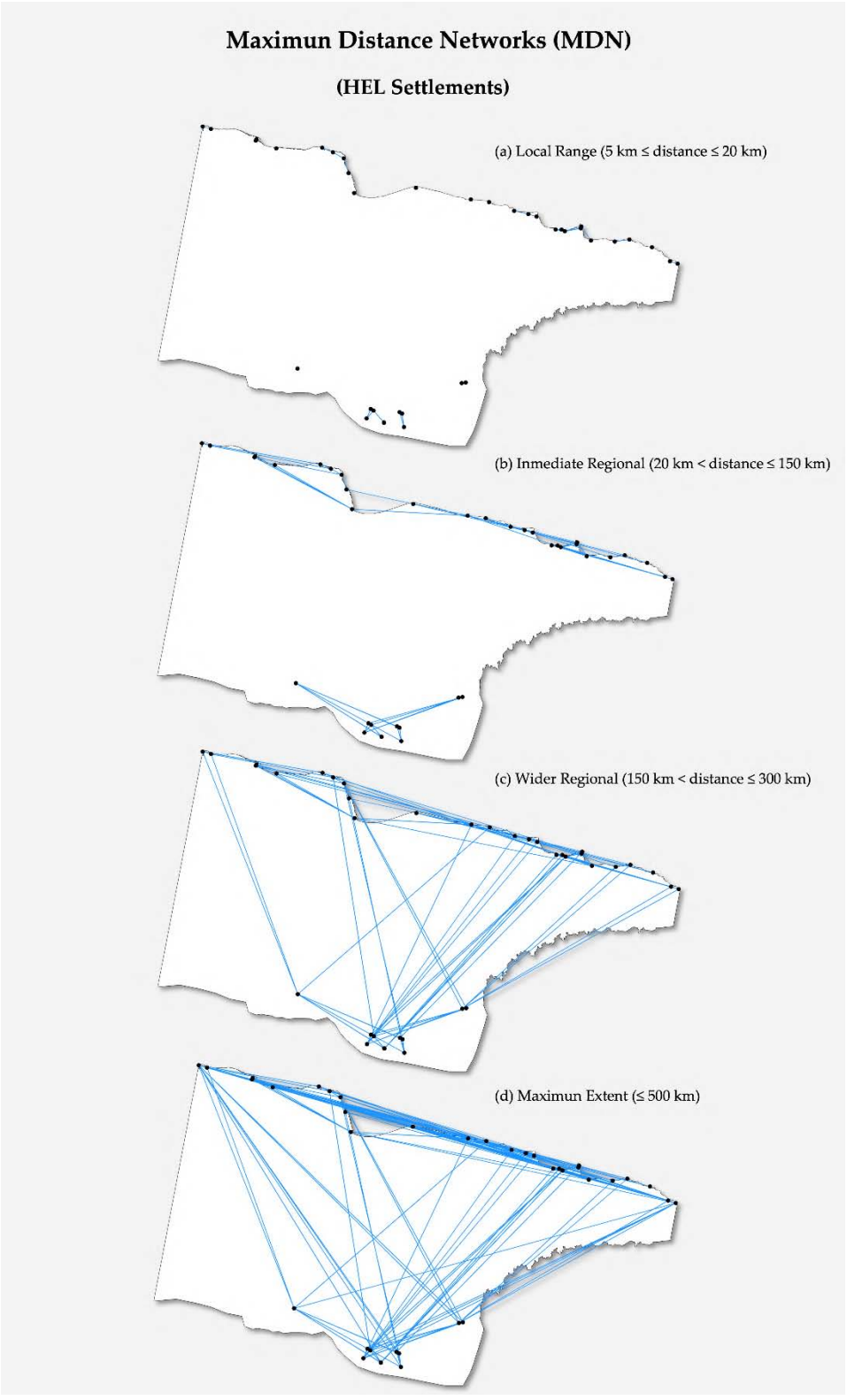


Figura 5.66. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del periodo Helenístico.

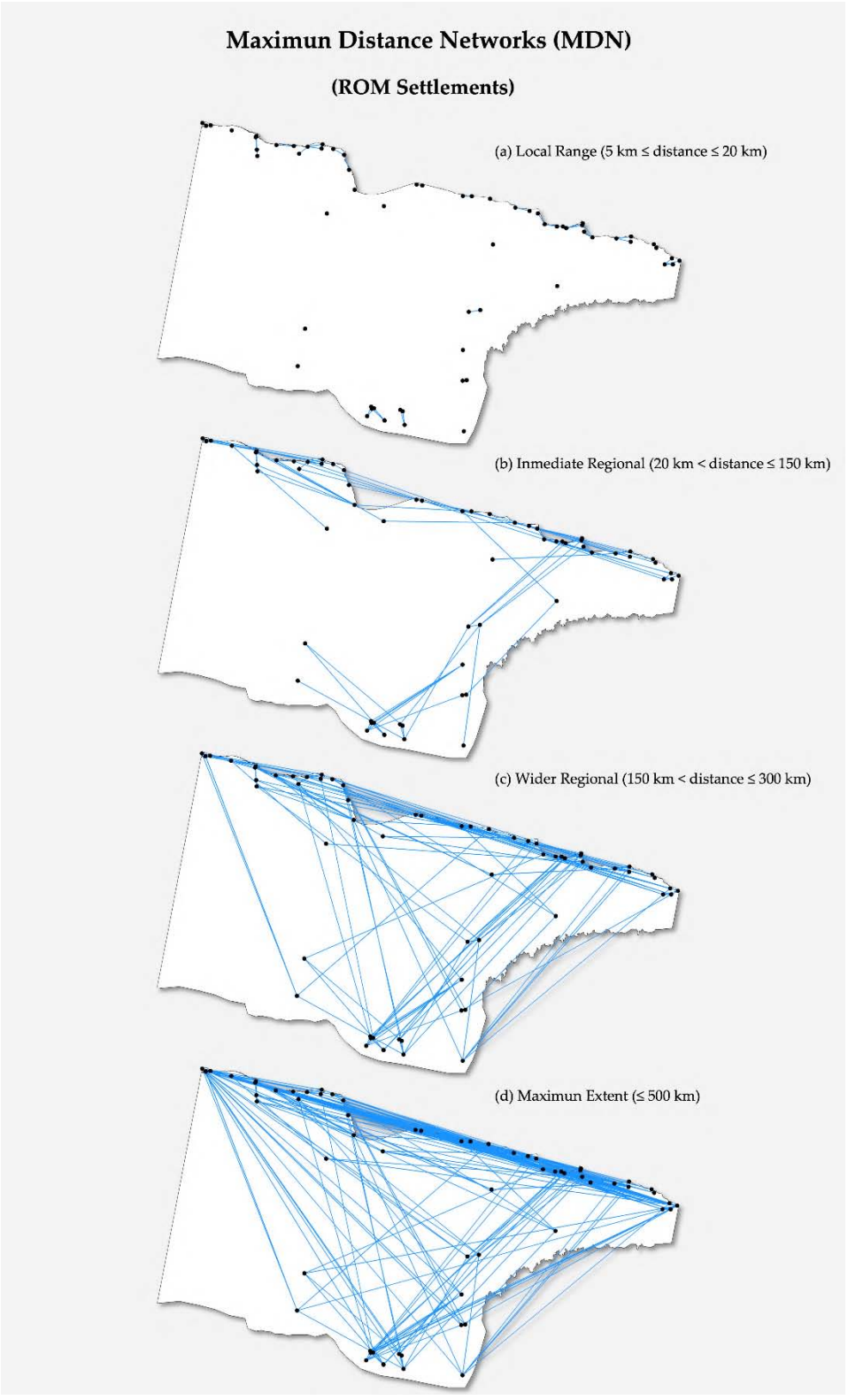


Figura 5.67. Modelo de red MDN aplicado a los asentamientos del periodo Romano.

Tabla 5.6. Resultados por periodo tras aplicar el modelo MDN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad.

Temporalities	MDN Scale	Nodes (Settlements)	Edges	Average Degree	Density
LBA	Local	8	6	1.5	0.2142
	Regional (Inmediate)	16	12	1.5	0.1
	Regional (Wider)	17	14	1.647	0.1029
	Maximun	17	16	1.882	0.1176
EIA	Local	6	4	1.333	0.2666
	Regional (Inmediate)	13	9	1.384	0.1153
	Regional (Wider)	14	12	1.714	0.1318
	Maximun	14	13	1.857	0.1428
ARC	Local	10	6	1.2	0.1333
	Regional (Inmediate)	18	13	1.444	0.0849
	Regional (Wider)	18	15	1.666	0.0980
	Maximun	18	17	1.888	0.1111
CLA	Local	12	7	1.166	0.1060
	Regional (Inmediate)	20	14	1.4	0.0736
	Regional (Wider)	20	16	1.6	0.0842
	Maximun	20	18	1.8	0.0947
HEL	Local	31	21	1.354	0.0451
	Regional (Inmediate)	38	28	1.473	0.0398
	Regional (Wider)	38	21	1.631	0.0440
	Maximun	38	35	1.842	0.0497
ROM	Local	57	39	1.368	0.0244
	Regional (Inmediate)	67	52	1.552	0.0235
	Regional (Wider)	67	50	1.492	0.0226
	Maximun	67	63	1.880	0.0284

En un segundo nivel de análisis, al igual que en el estudio de caso anterior, se implementaron distintos modelos de redes espaciales también basados en redes de proximidad, pero que utilizan la distancia cuadrática para definir regiones de influencia en la conexión entre nodos (asentamientos). El primero de estos modelos, que establece conexiones a partir de regiones de influencia, es el conocido como redes de vecindad relativa (*Relative Neighborhood Networks*, RNN). En este modelo, dos nodos se conectan solo si no existe un tercer nodo más cercano a ambos que la distancia que los separa. Este criterio garantiza que se establezcan únicamente las conexiones más directas y relevantes, priorizando los vínculos fundamentales entre asentamientos (Figuras 5.68 y 5.69 y Tabla 5.7). De este modo, estos modelos tienden a producir redes más simplificadas y menos densas, enfocándose exclusivamente en los vínculos esenciales. Esto permite observar patrones de interacción en función de las conexiones principales, que habrían sido clave para la cohesión y la interacción socioespacial de estas comunidades.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras aplicar este modelo a los patrones de localización y distribución de los antiguos asentamientos en Marmárica para las seis ventanas cronológicas consideradas. Al igual que en los modelos anteriores, se evaluaron las métricas esenciales para la caracterización de estas redes, es decir, el número de nodos conectados (asentamientos), el número de conexiones (enlaces), el grado promedio y la densidad de la red. Estas métricas han sido fundamentales para comprender la evolución de las conexiones entre los asentamientos a lo largo del tiempo, proporcionando información clave sobre los patrones de interacción y conectividad que definieron cada contexto histórico.

Bronce Final (LBA): Durante el Bronce Final, se identificaron 17 nodos (asentamientos) en la red, de los cuales casi todos están vinculados mediante 16 enlaces, lo que sugiere un nivel considerable de interconectividad. El grado promedio de 1.882 revela que, en promedio, cada asentamiento está conectado a casi dos vecinos, indicando una interacción moderada a escala local. Sin embargo, la densidad de 0.1176 muestra que no todas las conexiones posibles están activas, lo cual podría asociarse a la centralización de determinadas rutas o a la relevancia de asentamientos específicos. Estos nodos estratégicos podrían haber desempeñado un rol clave en el control territorial o el intercambio a lo largo de rutas de comunicación e intercambio. Así, aunque la red exhibe una conectividad moderada, la menor densidad sugiere que algunos asentamientos desempeñaban un papel destacado, actuando como centros estratégicos o puntos centrales para canalizar las dinámicas de interacción (Figura 5.68 y Tabla 5.7).

Inicio de la Edad del Hierro (EIA): Durante el EIA, se observa una disminución en el número de asentamientos, con 14 nodos conectados mediante 13 enlaces. Esto sugiere que la mayoría de los asentamientos mantienen vínculos con al menos uno o dos vecinos cercanos, reflejando una red relativamente estable. El grado promedio de 1.857, muy similar al registrado en el LBA, indica una continuidad en las interacciones locales, con un patrón de conexiones moderadas entre los nodos. Sin embargo, el incremento en la densidad de la red a 0.1428 sugiere que, aunque hay menos asentamientos, las conexiones entre ellos son más intensas. Esto puede estar relacionado con una mayor interdependencia entre los asentamientos activos, lo que podría haber facilitado una estructura de cooperación más cohesionada en términos de conectividad (Figura 5.68 y Tabla 5.7).

Periodo Arcaico (ARC): Durante el Periodo Arcaico, el número de asentamientos aumenta a 18 nodos, con 17 conexiones activas (enlaces), lo cual indica una expansión territorial. El grado promedio de 1.888 refleja que la red mantiene una estructura de interacciones en áreas cercanas, con casi dos conexiones por asentamiento, lo que sugiere una continuidad en la escala local. Sin embargo, la densidad de la red disminuye a 0.1111, lo que revela una menor proporción de conexiones posibles. Esta reducción en densidad indica una configuración más dispersa y menos cohesionada que en periodos previos, probablemente debido a la inclusión de asentamientos y la distribución más amplia de las conexiones. Esta tendencia apunta a que los asentamientos podrían estar ocupando áreas periféricas o más distantes, reduciendo la intensidad de las interacciones entre los asentamientos más centrales (Figura 5.68 y Tabla 5.7).

Periodo Clásico (CLA): En el Periodo Clásico, el número de asentamientos aumenta (20 nodos), con 19 conexiones (enlaces). Aunque este crecimiento refleja una expansión territorial, la densidad de la red desciende a 0.1, lo que indica que las conexiones entre los asentamientos se vuelven más dispersas. El grado promedio, de 1.9, señala que cada asentamiento mantiene casi dos conexiones en promedio, reflejando que las interacciones se mantienen estables. No obstante, la baja densidad sugiere que, a medida que crece el número de asentamientos, las relaciones se distribuyen de manera más fragmentada. Este patrón de expansión indica que la red extiende su alcance, lo que puede estar asociado a un sistema en el que ciertos nodos adquieren mayor importancia en la articulación de las interacciones (Figura 5.69 y Tabla 5.7).

Periodo Helenístico (HEL): Durante el Periodo Helenístico, se observa una expansión territorial notable, con un incremento considerable en la cantidad de nodos, (38 asentamientos conectados). A pesar de este crecimiento, el grado promedio de 2.0 indica que cada asentamiento mantiene, en promedio, dos conexiones, similar a los periodos previos. Sin embargo, la densidad de la red disminuye drásticamente a 0.0540, lo que sugiere una estructura mucho más dispersa. Esto implica que, aunque la cantidad de asentamientos creció, las interacciones entre ellos no son tan densas. Es probable que durante este periodo la red haya adoptado una configuración más estructurada, en la cual ciertos centros urbanos o asentamientos clave actúan como nodos principales de interacción, mientras que los asentamientos periféricos dependen de estos centros para mantener sus conexiones regionales (Figura 5.69 y Tabla 5.7).

Periodo Romano (ROM): En el Periodo Romano, la red alcanza su punto de máxima expansión, con 67 asentamientos (nodos) y 67 conexiones (enlaces). A pesar de este aumento, el grado promedio de 2.0 se mantiene constante, lo que indica que cada asentamiento sigue conectado, en promedio, a otros dos, similar a los periodos anteriores. No obstante, la densidad de la red disminuye a 0.0303, sugiriendo una estructura mucho más dispersa. Este incremento en el número de asentamientos bajo la administración romana señala una expansión territorial significativa. Es probable que esta configuración refleje una red extendida hacia áreas más periféricas y distantes, aumentando la fragmentación en las interacciones regionales (Figura 5.69 y Tabla 5.7).

En términos generales, la evolución en el número de asentamientos conectados refleja un crecimiento sostenido a lo largo de los periodos analizados, comenzando con 17 asentamientos durante el Bronce Final y

alcanzando su punto máximo con 67 en el periodo Romano. Sin embargo, este incremento no implica una mayor integración en la red, ya que la densidad disminuye progresivamente a medida que se incluyen más asentamientos. Esta caída en la densidad sugiere que, aunque las redes se expanden y abarcan un mayor número de nodos (asentamientos), el resultado es una estructura más dispersa y menos cohesionada, posiblemente en respuesta a una organización territorial más compleja y a un aumento en las distancias entre nodos. Esta mayor dispersión implica también un cambio en cuanto a las relaciones establecidas, donde los vínculos directos y constantes entre asentamientos poco a poco se transforman debido a las conexiones regionales.

Por otro lado, en los periodos más tempranos, como el Bronce Final (LBA), el inicio de la Edad del Hierro (EIA) y el Periodo Arcaico (ARC), los asentamientos exhiben una conectividad local relativamente alta, lo que sugiere un sistema de interacciones cercanas y cohesivas donde las conexiones locales mantienen el funcionamiento de la red. En contraste, a medida que avanzamos a periodos más tardíos, como el Clásico (CLA), Helenístico (HEL) y Romano (ROM), la red se dispersa, y la conectividad parece depender más de nodos estratégicos. Esta tendencia indica que, aunque la red se extiende a un territorio más amplio, las interacciones entre asentamientos son más regionalizadas, y ciertos centros o nodos clave juegan un papel fundamental en la articulación de las dinámicas y patrones de interacción en la región. Estos nodos estratégicos o centro clave de conexión, que funcionan como puntos de articulación en la red, facilitan la integración de áreas más alejadas, permitiendo que la red soporte el mantenimiento del sistema y una mayor complejidad en las interacciones socioespaciales.

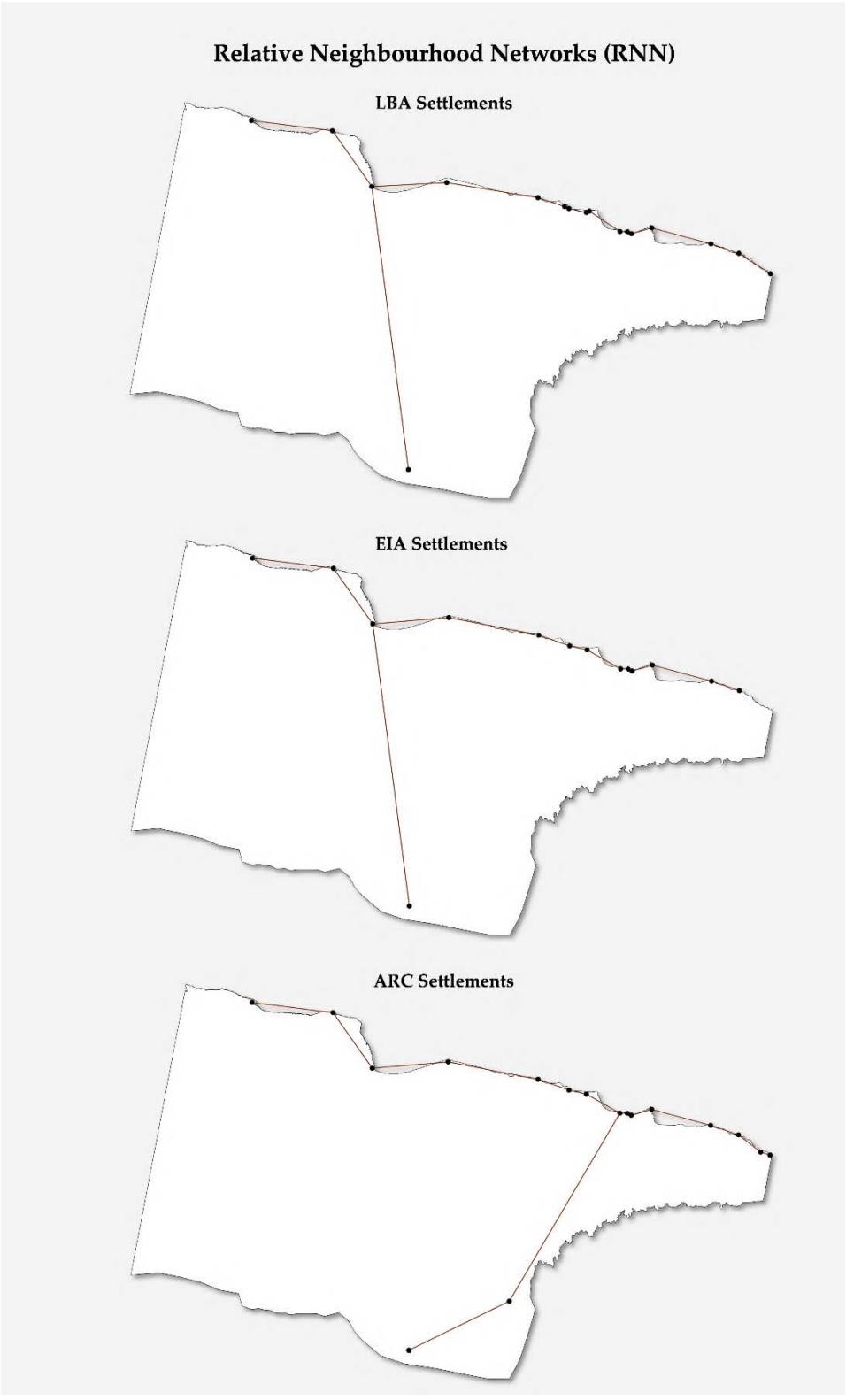


Figura 5.68. Modelo de red RNN para el Bronce Final, inicio de la Edad del Hierro y Arcaico.

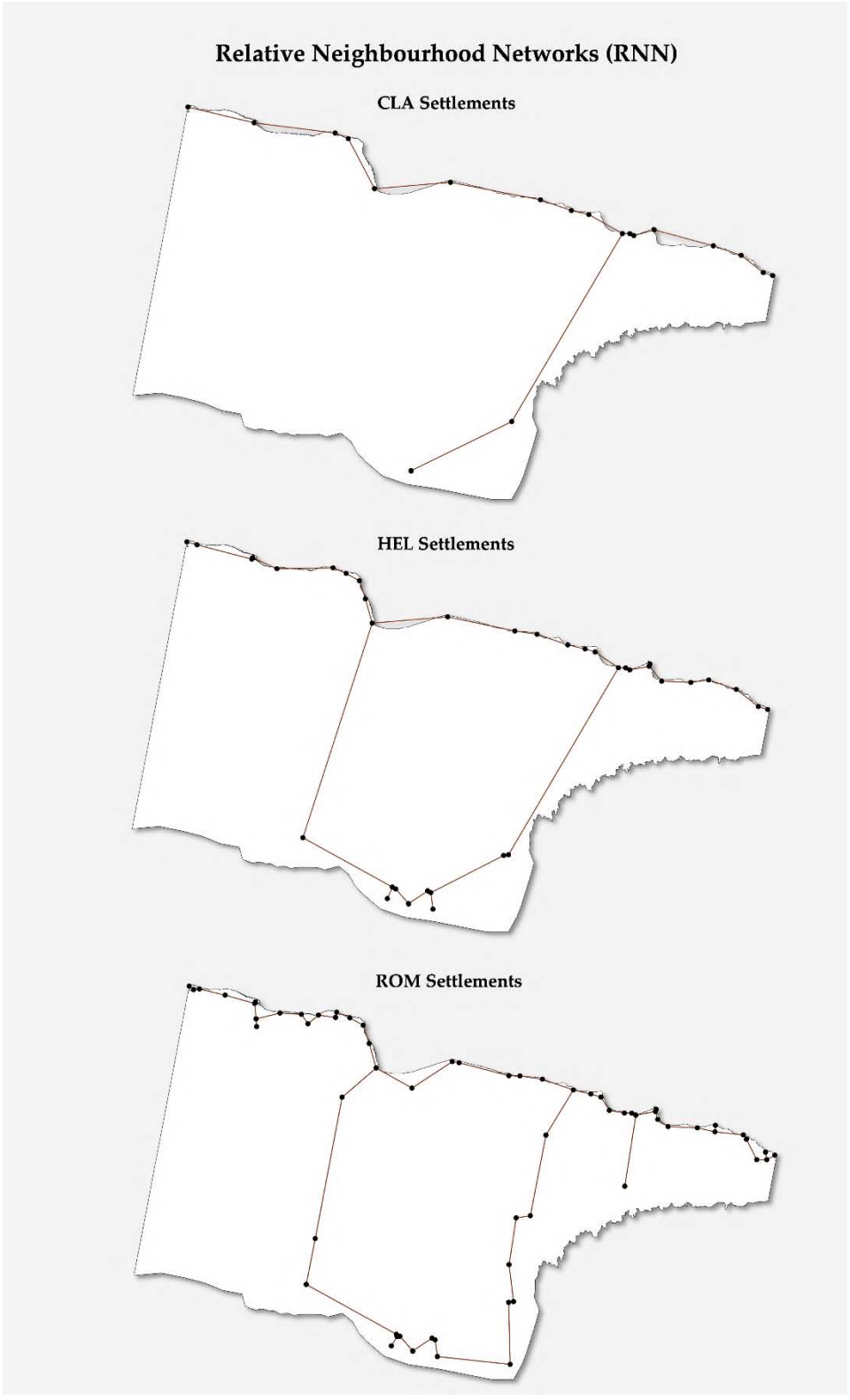


Figura 5.69. Modelo de red RNN para el periodo Clásico, Helenístico y Romano.

Tabla 5.7. Resultados por periodo tras aplicar el modelo RNN, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad.

Temporalities	Nodes (Settlements)	Edges	Average Degree	Density
LBA	17	16	1.882	0.1176
EIA	14	13	1.857	0.1428
ARC	18	17	1.888	0.1111
CLA	20	19	1.9	0.1
HEL	38	38	2.0	0.0540
ROM	67	67	2.0	0.0303

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación de los modelos de redes *Gabriel Graphs* (GG) y *β-Skeletons* para el caso específico de Marmárica. Estos modelos ofrecen una perspectiva amplia y detallada sobre la configuración de las redes, en la que los asentamientos se conectan en función de la ausencia de otros asentamientos en su región de influencia, definida por el parámetro β (β = 1, 1.5, 2, 3). El valor de β es fundamental, ya que determina el grado de conexión a distintas escalas de análisis. A valores más bajos, como β = 1 (GG), la red muestra la conectividad más limitada y local; en cambio, conforme β aumenta (β = 1.5, 2 o 3), se incorporan conexiones de mayor alcance, lo que expande la red y permite analizar interacciones más distantes y potencialmente la aparición de estructuras más complejas (Figuras 5.70 a 5.75 y Tabla 5.8).

A continuación, se realiza un análisis pormenorizado de los resultados para cada una de las seis ventanas cronológicas analizadas, evaluando las mismas métricas clave que en los modelos anteriores, es decir, número de nodos (asentamientos), número de conexiones (enlaces), grado promedio y densidad de la red. Todo ello, prestando especial atención a cómo los distintos umbrales de β impactan en la estructura socioespacial de las redes identificadas.

Bronce Final (LBA): Durante el Bronce Final, la red muestra una conectividad moderada en valores de β = 1 y β = 2, lo cual sugiere la existencia de interacciones locales entre asentamientos cercanos. El grado promedio, cercano a 2.0 para β = 1.5 y β = 2, indica que cada asentamiento estaba conectado, en promedio, a otros dos, reflejando una estructura caracterizada por relaciones inmediatas y directas. Al analizar el valor de β = 3, la red exhibe un notable aumento en las conexiones, alcanzando 29 enlaces y un grado promedio de 3.411. Este incremento en la conectividad revela una expansión en la escala de interacción, donde los asentamientos ya no se limitan a vincularse con vecinos inmediatos, sino que establecen relaciones más amplias con otros más distantes. Esto sugiere que, durante este periodo, existía una interacción a escala regional que facilitaba el intercambio entre asentamientos más alejados (Figura 5.70 y Tabla 5.8).

Inicio de la Edad del Hierro (EIA): Durante el inicio de la Edad del Hierro, la red evidencia un incremento en densidad y conectividad local en comparación con el Bronce Final, especialmente en configuraciones de β = 1.5 y β = 2. El aumento gradual del grado promedio indica que los asentamientos establecían más conexiones entre sí, lo cual sugiere un sistema de interacción más cohesionado. La mayor conectividad en estos umbrales refleja un proceso de consolidación a esta escala. Con β = 3, la red presenta un notable

incremento en el número de enlaces, alcanzando 28 conexiones y un grado promedio de 4.0. Este aumento sugiere una mayor interconectividad a nivel regional, señalando un sistema de interacción consolidado. La densidad y grado promedio en este nivel refuerzan la idea de una integración regional más amplia e intensa (Figura 5.71 y Tabla 5.8).

Periodo Arcaico (ARC): En el periodo Arcaico, la red de asentamientos exhibe un comportamiento similar al observado durante el LBA en valores de β más bajos (1 y 1.5), con una densidad moderada y un grado promedio de 2.1, lo cual sugiere una estructura cohesionada a nivel de conexiones locales. Los asentamientos se vinculan principalmente con sus vecinos inmediatos, reflejando una organización territorial donde las interacciones a esta escala continuaban siendo esenciales. En cambio, al analizar β = 3, se observa un notable incremento en la cantidad de enlaces: la red alcanza 33 conexiones y un grado promedio de 3.666, lo que implica una mayor conectividad regional. Este aumento parece indicar una red más densa e interconectada a esta escala, con una creciente interdependencia entre los asentamientos más distantes. La progresión en la conectividad conforme se incrementa β respalda la idea de que, además de las interacciones locales, los asentamientos mantenían relaciones con comunidades más alejadas (Figura 5.72 y Tabla 5.8).

Periodo Clásico (CLA): En el periodo Clásico, las conexiones entre asentamientos permanecen relativamente limitadas en valores bajos de β (1 y 1.5), lo que revela una red dispersa con menor grado promedio y densidad. Este patrón sugiere que, a nivel local, las interacciones se centraban en vínculos directos y cercanos. Sin embargo, en valores más altos de β, la red muestra un cambio significativo. Por ejemplo, con β = 3, la red se incrementa a 36 enlaces y un grado promedio de 3.6, lo que indica una estructura más

densa e interconectada. Este aumento en las conexiones destaca la relevancia de las relaciones estratégicas entre asentamientos más alejados, lo que sugiere que las conexiones regionales eran fundamentales para la organización y los patrones de interacción durante este periodo. Estas dinámicas apuntan a la posible existencia de rutas comerciales o estructuras interregionales que favorecían la integración territorial a mayor escala, mientras que los asentamientos locales mantenían cierto grado de autonomía (Figuras 5.73 y Tabla 5.8).

Periodo Helenístico (HEL): Durante el periodo Helenístico, el número de asentamientos experimenta un crecimiento significativo en comparación con los periodos anteriores. En consecuencia, la densidad de la red se mantiene baja en los valores más reducidos de β (1 y 1.5), lo cual sugiere una estructura más dispersa. Esta tendencia podría estar asociada con una fase de reorganización territorial en la que se integran comunidades que se distribuyen de manera más amplia. No obstante, aunque la densidad local es baja, la red con $\beta = 3$ muestra una conectividad regional notable, con 56 enlaces y un grado promedio de 2.947. Esto sugiere que, aunque la interacción cercana parece menos significativa, los centros regionales cumplían un rol significativo en la estructura del sistema. La expansión territorial, junto con la dispersión de las interacciones locales, podría haber dado lugar a una red menos densa pero aún esencial en términos de conectividad a escala regional (Figura 5.74 y Tabla 5.8).

Periodo Romano (ROM): Durante el periodo Romano (ROM), se observa el mayor número de asentamientos conectados en comparación con las etapas anteriores. En contraste, los valores de $\beta = 1$ y $\beta = 1.5$ muestran una densidad muy baja, lo que sugiere una estructura dispersa a nivel local. Esta disposición

podría estar asociada a una fase de expansión territorial y, en consecuencia, a una menor dependencia de las conexiones directas, similar a las del periodo anterior. Sin embargo, al incrementar el valor a β = 3, la red muestra una mayor densidad, con 145 enlaces y un grado promedio de 4.328, lo cual indica que, en promedio, cada asentamiento estaba vinculado a más de cuatro asentamientos. Este aumento considerable en la conectividad refleja una reconfiguración a nivel regional, probablemente facilitada por la infraestructura romana que fomentaba la interacción y el intercambio a larga distancia. Así, aunque las relaciones locales eran dispersas, las conexiones a escalas más amplias parecen haber sido cruciales durante este periodo, resultando en una red cohesionada a nivel regional, impulsada posiblemente por la administración romana (Figura 5.75 y Tabla 5.8).

En definitiva, en los periodos más tempranos analizados, como el Bronce Final (LBA) y el inicio de la Edad del Hierro (EIA), las redes de interacción exhiben una conectividad limitada cuando el valor de β es bajo. Esta limitación sugiere que las comunidades dependían principalmente de relaciones próximas y directas, posiblemente para consolidar sus vínculos o gestionar de manera eficiente los recursos limitados. Sin embargo, a medida que el valor de β se incrementa, las redes se amplían, reflejando un cambio en las interacciones regionales hacia una mayor cooperación y conexión territorial a escalas mayores.

En periodos más tardíos, como el Helenístico (HEL) y Romano (ROM), la configuración espacial de las redes muestra una transición hacia una estructura más dispersa a nivel local, probablemente relacionada con la expansión territorial. En estos periodos, el aumento en el número de asentamientos conectados coincide con una mayor dispersión de las

interacciones locales, mientras que las redes regionales conservan una cohesión relativa, sugiriendo una posible estructura organizativa donde los centros regionales desempeñaban un rol estratégico. Esta hipótesis se refuerza al observar los valores más elevados de β, especialmente en $\beta = 3$, donde las redes revelan un incremento significativo en densidad, lo cual sugiere un cambio en las dinámicas de interacción. Este aumento en conectividad puede interpretarse como una integración territorial más cohesionada, evidenciando transformaciones en las relaciones entre comunidades y facilitando una mayor cohesión entre áreas más distantes.

En conjunto, estos resultados evidencian una evolución constante en la estructura y dinámica de las redes socioespaciales en Marmárica, donde tanto la disposición de los asentamientos como el nivel de conexión regional parecen responder a una estrategia adaptativa ante la confluencia de diversos factores, tanto humanos como no humanos. En este sentido, se observan patrones claros donde, a pesar de la relevancia de las conexiones o relaciones próximas, la importancia de las redes regionales para mantener la cohesión del sistema es evidente. Por otro lado, también se observa cómo, a medida que estas redes se expanden abarcando más asentamientos y territorios, se vuelven más complejas, ya que se vuelven más dispersas, aunque determinados asentamientos desempeñan un rol clave para la sostenibilidad del sistema. Este enfoque permite observar cómo, a lo largo de los periodos analizados, estas comunidades ajustaron sus redes y patrones de interacción para preservar la conectividad y el intercambio en un contexto en constante evolución. Además, el dinamismo de estas redes sugiere un sistema social resiliente, capaz de responder a las fluctuaciones del entorno y de adaptarse a la expansión territorial y a las variaciones en los recursos disponibles.

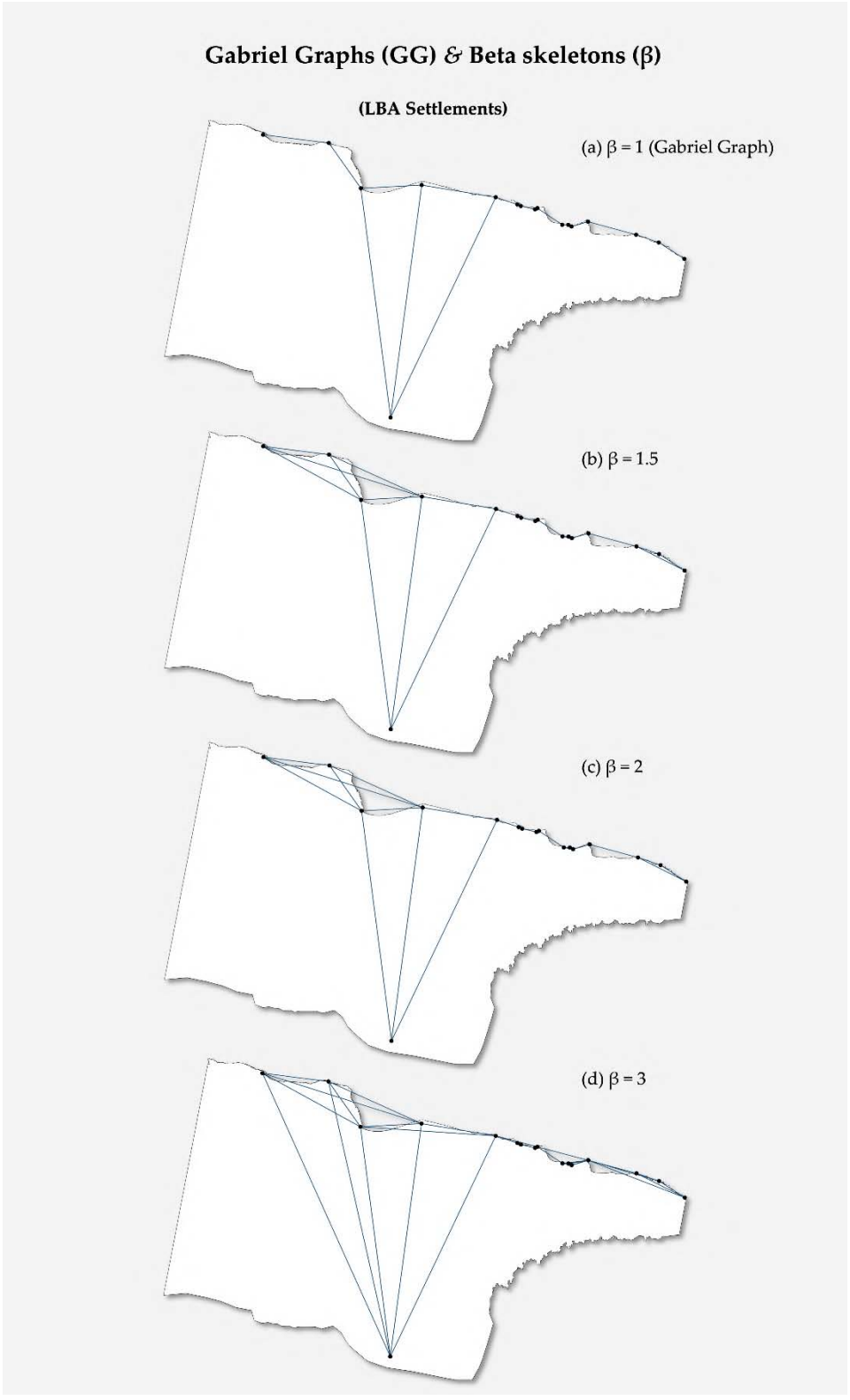


Figura 5.70. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al Bronce Final.



Figura 5.71. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al inicio de la Edad del Hierro.



Figura 5.72. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Arcaico.



Figura 5.73. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Clásico.



Figura 5.74. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Helenístico.

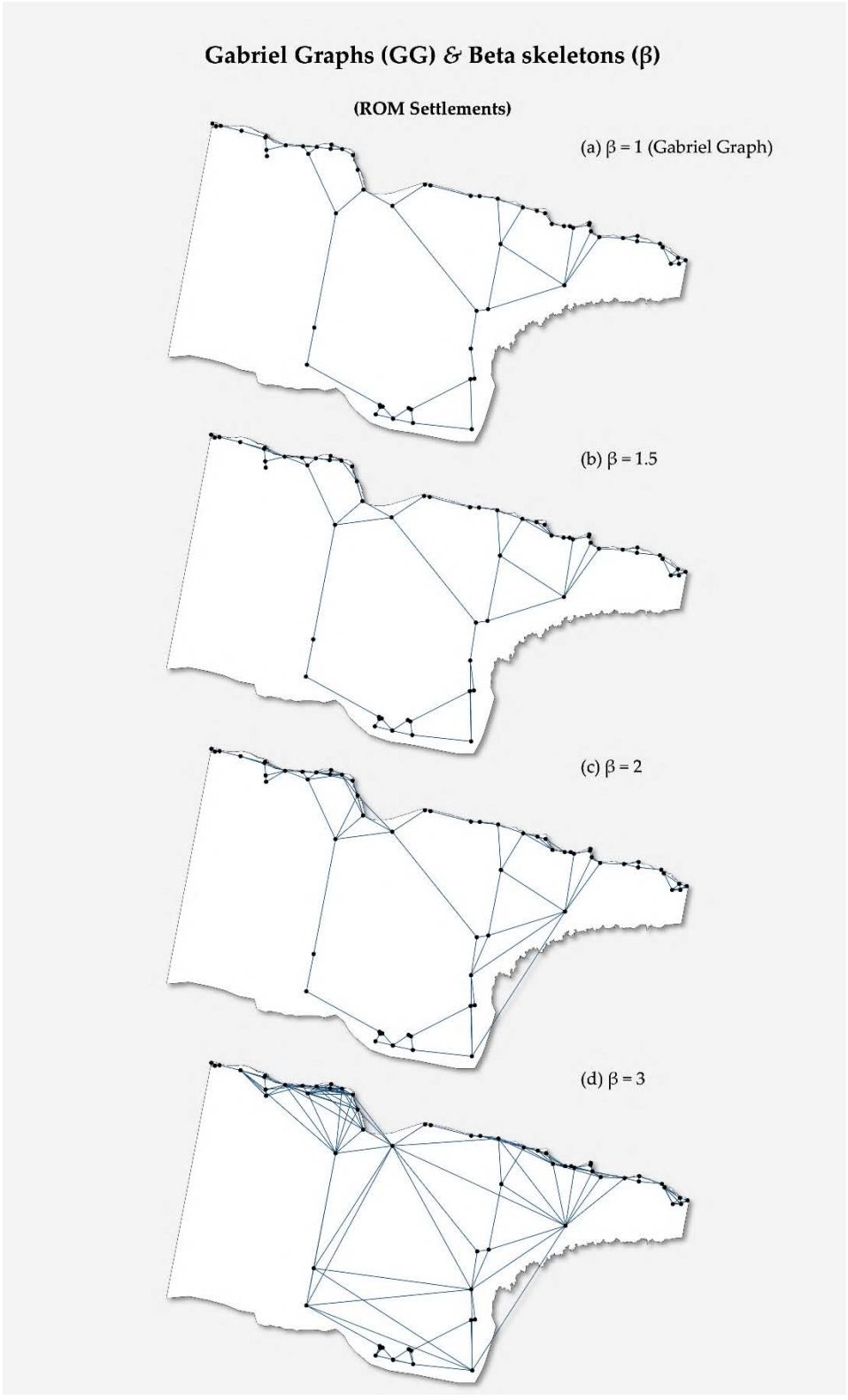


Figura 5.75. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Romano.

Tabla 5.8. Resultados tras aplicar el modelo GG y *β-Skeletons*, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad.

Temporalities	Scale	Nodes (Settlements)	Edges	Average Degree	Density
LBA	β = 1 (Gabriel Graph)	17	18	2.117	0.1323
	β = 1.5	15	15	2.0	0.1428
	β = 2	17	17	2.0	0.125
	β = 3	17	29	3.411	0.2132
EIA	β = 1 (Gabriel Graph)	14	15	2.142	0.1648
	β = 1.5	13	15	2.307	0.1923
	β = 2	14	17	2.428	0.1868
	β = 3	14	28	4.0	0.3076
ARC	β = 1 (Gabriel Graph)	18	19	2.111	0.1241
	β = 1.5	17	18	2.117	0.1323
	β = 2	18	22	2.444	0.1437
	β = 3	18	33	3.666	0.2156
CLA	β = 1 (Gabriel Graph)	20	21	2.1	0.1105
	β = 1.5	19	16	1.684	0.0935
	β = 2	20	22	2.2	0.1157
	β = 3	20	36	3.6	0.1894
HEL	β = 1 (Gabriel Graph)	38	42	2.210	0.0597
	β = 1.5	33	29	1.757	0.0549
	β = 2	38	42	2.210	0.0597
	β = 3	38	56	2.947	0.0796
ROM	β = 1 (Gabriel Graph)	67	85	2.537	0.0384
	β = 1.5	64	62	1.937	0.0307
	β = 2	65	79	2.430	0.0379
	β = 3	67	145	4.328	0.0655

5.4.3 Mar de Libia: un marco multiescalar

Más allá de los estudios de caso presentados anteriormente, esta investigación ha mantenido siempre un enfoque comparativo orientado a establecer una narrativa coevolutiva entre las dinámicas socioecológicas e históricas entre Creta y Marmárica. Con este propósito, el análisis se centra ahora específicamente en el contexto del Mar de Libia, considerando su papel como un lugar de conexión entre ambas realidades. En este marco, el enfoque adoptado busca reconstruir la evolución de las redes socioespaciales que articularon las relaciones entre estas dos regiones, mediante un análisis multiescalar —local, regional y de larga distancia— y diacrónico (*longue durée*). Estos enfoques no solo proporcionan una visión integral de las dinámicas de interacción y su evolución a través del tiempo, sino que también permiten identificar y analizar los periodos de cambio, ruptura y continuidad que moldearon estas sociedades y paisajes. Además, esta aproximación sitúa dichas dinámicas en un marco más amplio de interacciones en el Mediterráneo oriental, ampliando nuestra comprensión del papel desempeñado por estas regiones en las redes de intercambio y movilidad entre el ámbito egeo y el norte de África.

Para abordar este desafío, entre los distintos enfoques y aproximaciones desplegados a lo largo de este trabajo, se ha determinado que los modelos de redes espaciales basados en regiones de influencia, específicamente *Gabriel Graphs* (GG) y *β-skeletons*, resultan especialmente útiles para este propósito. Estas metodologías permiten capturar con mayor precisión la complejidad inherente a las redes de interacción históricas que marcaron la evolución de estas sociedades. Como se ha destacado en este capítulo, esto se debe a que estos modelos superan la rigidez de las redes de proximidad basadas en la

distancia euclidiana, empleando en su lugar la distancia cuadrática para establecer las conexiones. En este enfoque, dos nodos se conectan únicamente si no existe otro nodo dentro de su región de influencia, ajustada según la distribución espacial de los mismos, lo que añade flexibilidad en la definición de las conexiones.

Al modelar estos sistemas, se ha podido representar explícitamente las conexiones socioespaciales que estructuraron las redes de comunicación e intercambio tanto dentro como entre las regiones de Creta y Marmárica, abarcando distintas escalas espaciales y periodos históricos —desde el Bronce Final hasta el periodo romano (Figuras 5.76 y 5.77 y Tabla 5.9). Para lograrlo, se ha seguido el mismo procedimiento evaluando una serie de métricas de red clave, como el número de nodos (asentamientos) conectados, el número de enlaces (conexiones), el grado promedio y la densidad de estas redes. De este modo, estas métricas han proporcionado una base cuantitativa sólida para explorar y comprender los patrones y dinámicas de interacción presentes en cada nivel y periodo, los cuales se detallan a continuación.

Bronce Final (LBA): Durante el Bronce Final, las redes presentan una estructura moderadamente conectada para valores de β = 1 (GG), con un grado promedio de 3.347 y una densidad baja (0.0070). Esto sugiere que las interacciones entre los asentamientos eran más limitadas a esta escala, conectando principalmente aquellos con posibilidad de relaciones geográficas directas. Estos patrones reflejan una conectividad más local, centrada en vínculos cercanos y probablemente asociados a actividades y relaciones de corto alcance. Sin embargo, al aumentar los valores de β (2 y 3), se observa un incremento significativo en la interconexión: los enlaces pasan de 795 en β = 1 a 2.429 en β = 3. Este crecimiento en el número de conexiones indica que,

aunque las relaciones locales eran fundamentales, también existían vínculos esenciales entre asentamientos más distantes. Estos patrones sugieren la existencia de redes más amplias y estratégicas, posiblemente facilitadas por vías de comunicación e intercambio a mayor escala, que conectaban no solo asentamientos cercanos, sino también regiones distantes entre Creta y la costa libio-egipcia. La alta conectividad observada en los valores más elevados de β (β = 3) pone de manifiesto que, durante el LBA, existían redes a gran escala que de forma continua vinculaban bidireccionalmente asentamientos estratégicos de ambas regiones a través de las principales rutas marítimas identificadas (Figura 5.76 y Tabla 5.9).

Inicio de la Edad del Hierro (EIA): Durante el inicio de la Edad del Hierro, el total de asentamientos conectados disminuye a 307, una cifra inferior en comparación con el LBA. En el caso de β = 1 (GG), las redes mantienen características similares al periodo anterior, con una baja densidad (0.0106) y un grado promedio de 3.270, lo que sugiere que la conectividad estaba limitada principalmente a los asentamientos cercanos. Este patrón indica que las interacciones locales seguían siendo significativas, aunque limitadas a relaciones geográficas próximas. En cambio, a medida que el valor de β aumenta, especialmente en β = 3, las conexiones crecen notablemente, y el grado promedio se eleva a 9.504, con una densidad de 0.0310. Esto implica que, juntos a las conexiones locales, también existían interacciones a mayor escala, lo que evidencia que las redes de interacción regionales y posiblemente interregionales también eran relevantes. Sin embargo, este periodo parece estar marcado por una mayor fragmentación de las redes en comparación con el LBA, posiblemente debido a cambios en la estructura sociopolítica y socioeconómica en ambas regiones. Este hecho se evidencia en que algunos de los enlaces fundamentales que existían durante el LBA parecen haberse

debilitado, como las rutas que conectaban la costa sur-central de Creta con puertos clave en Marmárica, como Marsa Matruh. A pesar de esta fragmentación, las redes muestran una interconectividad creciente a escalas más amplias (para valores elevados de β), lo que sugiere que ambas regiones continuaban estando conectadas, reflejando una reorganización de los patrones de interacción como respuesta adaptativa ante un periodo de cambio (Figura 5.76 y Tabla 5.9).

Periodo Arcaico (ARC): En el Periodo Arcaico, las redes conservan características similares en cuanto a conectividad local para $\beta = 1$ (GG), con un grado promedio de 3.271 y una densidad baja de 0.0102. Esto indica que las interacciones en esta escala seguían concentrándose principalmente en conexiones entre asentamientos próximos, reflejando una estructura predominantemente local, como la observada durante el EIA. Sin embargo, al incrementar el valor de β (2 y 3), se percibe un aumento notable en la conectividad y en el número de enlaces, alcanzando 1.572 conexiones para $\beta = 3$. Esto sugiere que, además de las interacciones locales, las redes a gran escala que enlazaban asentamientos más lejanos desempeñaban un papel estratégico durante este periodo. El crecimiento de las conexiones en escalas más amplias indica que las interacciones entre los asentamientos de Creta y Marmárica no solo se mantenían, sino que posiblemente estaban más consolidadas. La densidad de la red para $\beta = 3$ (0.0306) muestra que, estas conexiones extensas eran esenciales para sostener relaciones a nivel regional e interregional. Este fenómeno podría estar vinculado a la consolidación de redes que permitían una mayor interconexión entre áreas distantes, facilitando un sistema de intercambio más amplio y complejo. En consecuencia, las redes de este periodo muestran patrones que, aunque mantienen similitudes en la conectividad local con los periodos anteriores,

revelan un incremento significativo en la conectividad regional para valores elevados de β, lo cual podría estar asociado con una reorganización y consolidación de las interacciones entre asentamientos de ambas regiones en un contexto más amplio (Figura 5.76 y Tabla 5.9).

Periodo Clásico (CLA): Durante el Periodo Clásico, las redes de interacción muestran una menor cantidad de asentamiento, con 200 nodos, pero con una densidad creciente a medida que se incrementa el valor de β, alcanzando 0.0510 para $\beta = 3$. Este aumento en la densidad sugiere que, aunque el número de asentamientos conectados es más reducido en comparación con periodos anteriores, las redes exhiben una mayor interconexión y cohesión. Del igual modo, la elevada densidad refleja un sistema donde las conexiones entre asentamientos son más amplias y estables. El grado promedio de 10.16 para $\beta = 3$ refuerza la idea de una mayor integración entre asentamientos en redes regionales, lo que indica que, en este periodo, las relaciones entre distintos asentamientos eran más frecuentes y abarcaban mayores distancias. Este patrón puede estar asociado con la expansión de redes comerciales, impulsada por un contexto más complejo. Así, este periodo evidencia una consolidación progresiva de los asentamientos en redes amplias e interconectadas, especialmente para $\beta = 3$, lo que sugiere una estructura más centralizada y una creciente dependencia de rutas de larga distancia. Esto pudo haber sido fundamental en la configuración de las dinámicas socioeconómicas de ambas áreas, con una mayor integración de los asentamientos en un sistema de interacción más complejo (Figura 5.77 y Tabla 5.9).

Periodo Helenístico (HEL): Durante el Periodo Helenístico, las redes muestran un número reducido de asentamientos (142 nodos), pero destacan por una densidad notablemente alta, especialmente para $\beta = 3$, con un valor de 0.0622. Esto indica que, aunque había menos asentamientos conectados en comparación con periodos anteriores, estos estaban fuertemente interconectados en redes regionales densas, lo que podría reflejar una intensa interacción entre los asentamientos a escalas mayores. El grado promedio de 8.774 para $\beta = 3$ refuerza esta idea, ya que señala que cada asentamiento estaba, en promedio, conectado con casi otros nueve asentamientos, lo que se traduce en una interdependencia significativa para mantener la conectividad entre ellos. Este grado de conexión puede estar relacionado con la mayor integración política y comercial que caracteriza al periodo Helenístico, lo que facilitó una red más cohesionada y estructurada. De manera similar, el aumento en la densidad y el grado promedio también reflejan que, durante este periodo, los asentamientos formaban parte de una red fuertemente integrada, lo que denota un alto nivel de interacción entre Creta y Marmárica. Esto implica que las conexiones a escalas mayores fueron clave para la cohesión general de las redes durante este periodo. Esto apunta a un sistema de interacción más amplio, probablemente facilitado por la intensificación de las rutas comerciales que se desarrollaron durante este periodo (Figura 5.77 y Tabla 5.9).

Periodo Romano (ROM): En el Periodo Romano, la red de asentamientos alcanza el mayor número de nodos conectados, con un total de 585, aunque muestra una baja densidad en los valores bajos de β, específicamente en $\beta = 1$ (GG), donde la densidad es de 0.0055. Esto sugiere que, a nivel local, la red se muestra muy dispersa, posiblemente reflejando una fase de expansión territorial durante esta etapa, lo cual diluye las interacciones cercanas en favor

de conexiones a escalas superiores. Al analizar β = 3, el número de enlaces alcanza su punto máximo con 2.763 conexiones, lo que evidencia un notable incremento en la conectividad. En este caso, la densidad se eleva a 0.0161 y el grado promedio llega a 9.446, indicando que, en promedio, cada asentamiento estaba vinculado a casi otros diez asentamientos. De este modo, la expansión territorial bajo la administración romana y la consolidación de rutas comerciales en el Mediterráneo probablemente favorecieron estas conexiones extensas, facilitando los flujos de comunicación e intercambio. Así, el contraste entre la baja densidad local y la fuerte integración regional e interregional refleja la estructura de este periodo, en el que las rutas de media y larga distancia, junto a los nodos estratégicos, desempeñaban un papel clave para mantener la cohesión del sistema (Figura 5.77 y Tabla 5.9).

En términos generales, a lo largo de los distintos periodos analizados, las redes socioespaciales que conectaban los asentamientos entre Creta y Marmárica experimentaron una notable evolución. Desde los periodos más tempranos, como el Bronce Final (LBA) y el inicio de la Edad del Hierro (EIA), hasta los periodos más recientes, como el Clásico (CLA), el Helenístico (HEL) y el Romano (ROM), estas redes alcanzaron niveles cada vez mayores de interconexión, ampliando su alcance y comenzando a incorporar vínculos a escalas territoriales más amplias. Esta expansión no solo sugiere un cambio en la organización espacial, sino que también refleja la creciente importancia de las redes de comunicación e intercambio entre ambas regiones. Así, a medida que los asentamientos se incorporaban a estas redes, los sistemas de comunicación evolucionaban para consolidar rutas estratégicas y asegurar la interacción. Este cambio estructural subraya una transición hacia redes más complejas que integraban un mayor número de asentamientos y que exhibían mayores densidades a escalas más amplias, lo cual indica que las interacciones

de carácter regional e interregional estaban ampliamente consolidadas y estructuradas.

No obstante, el análisis de las variaciones mostradas por estas redes también pone de manifiesto el dinamismo y la adaptabilidad de estas estructuras, especialmente en su capacidad para ajustar las conexiones en respuesta a periodos de cambio, ruptura o reconfiguración territorial debido a la eliminación de nodos o enlaces. Estos cambios influyen directamente en las interacciones entre las comunidades representadas en la red. Estas variaciones se identifican al examinar los valores más bajos de β, donde se observa una conectividad más limitada y local. Por el contrario, los valores más altos permiten explorar redes más amplias, revelando la complejidad de las interacciones regionales e interregionales. Esta flexibilidad indica que, durante determinadas fases o periodos, las redes socioespaciales podían reconfigurarse para preservar conexiones esenciales, lo que demuestra su resiliencia y adaptabilidad. Además, este enfoque subraya la relevancia de ciertos nodos o enlaces estratégicos dentro de la red, que habrían actuado como puntos críticos de centralización y movilidad. Estos puntos estratégicos habrían facilitado el intercambio de bienes, personas e ideas a lo largo de las diversas escalas espaciales y periodos analizados.

En relación con estos nodos críticos y rutas centrales estratégicas, destacan principalmente las conexiones marítimas que enlazaban puertos clave, como Kommos y Matala (costa sur-central de Creta); Palaiokhora o Loutro (costa sur-occidental de Creta); o Ierapetra (*Ierapytna*) (costa sur-oriental de Creta), con otros puertos situados en la costa libio-egipcia, entre ellos Antipyrgos (Tobruk), Menelaus (Marsa Lukk), Sollum (Akabah el-Kebir) o Paraetonium (Marsa Matruh). Estos centros se mantuvieron de manera consistente como

puntos centrales de conectividad, desde los cuales las conexiones se redistribuían hacia otros asentamientos mediante rutas tanto terrestres como marítimas (cabotaje).

A medida que las redes se volvían más complejas, estas se expandían para integrar zonas periféricas estratégicas, conectando, por ejemplo, los puertos mediterráneos con los oasis del interior, como Al-Jaghbub, Siwa y Qara, situados en los márgenes del desierto de Libia. Estos procesos de expansión ponen de manifiesto una diversificación de los puntos de conexión, integrando áreas que no solo servían como nexos comerciales, sino también como puntos de acceso a recursos naturales y centros culturales.

Finalmente, al comparar estas estructuras y su evolución a lo largo de los distintos periodos analizados, ha sido posible identificar diversas pautas en la localización y distribución de las conexiones, lo que permite comprender mejor cómo estas redes influyeron y, a su vez, se vieron influenciadas por las condiciones geográficas y ambientales, los flujos de movilidad e intercambio, la organización política y territorial, así como las estructuras y patrones de interacción socioeconómicos entre las comunidades de Creta y Marmárica a lo largo del Mar de Libia. Este análisis proporciona una visión detallada de la evolución de las redes socioespaciales y las estrategias implementadas por estas sociedades para sostener y preservar dichos sistemas en un entorno geográficamente extenso y diverso. Estas estrategias se fundamentaban en la fortaleza tanto de los vínculos locales como de las conexiones regionales e interregionales. En consecuencia, los resultados evidencian la capacidad de las redes para adaptarse durante fases de cambio, lo que pone de manifiesto la resiliencia de las sociedades que habitaron estas regiones a lo largo del tiempo.

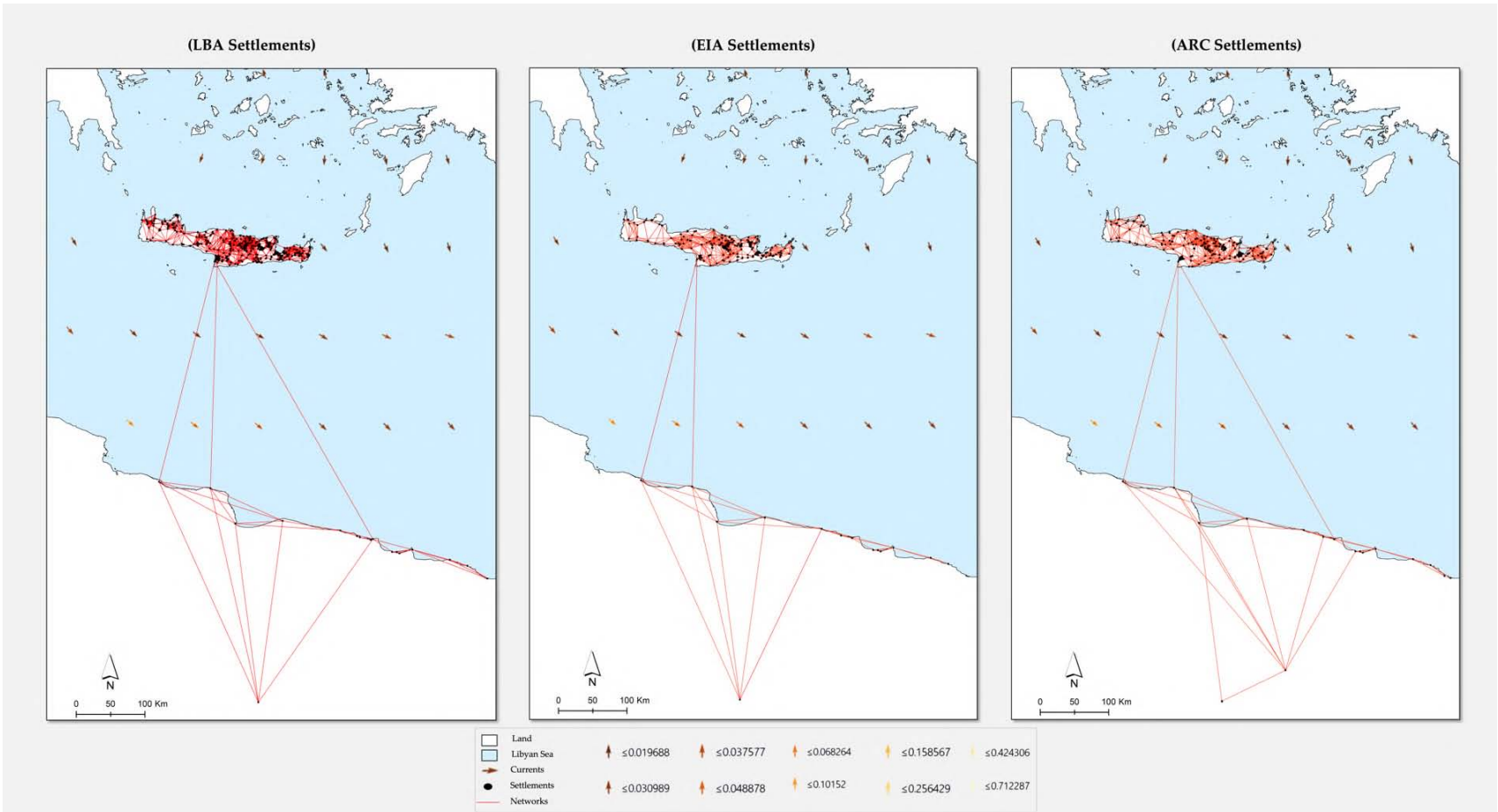


Figura 5.76. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al Bronce Final, inicio de la Edad del Hierro y el periodo Arcaico.

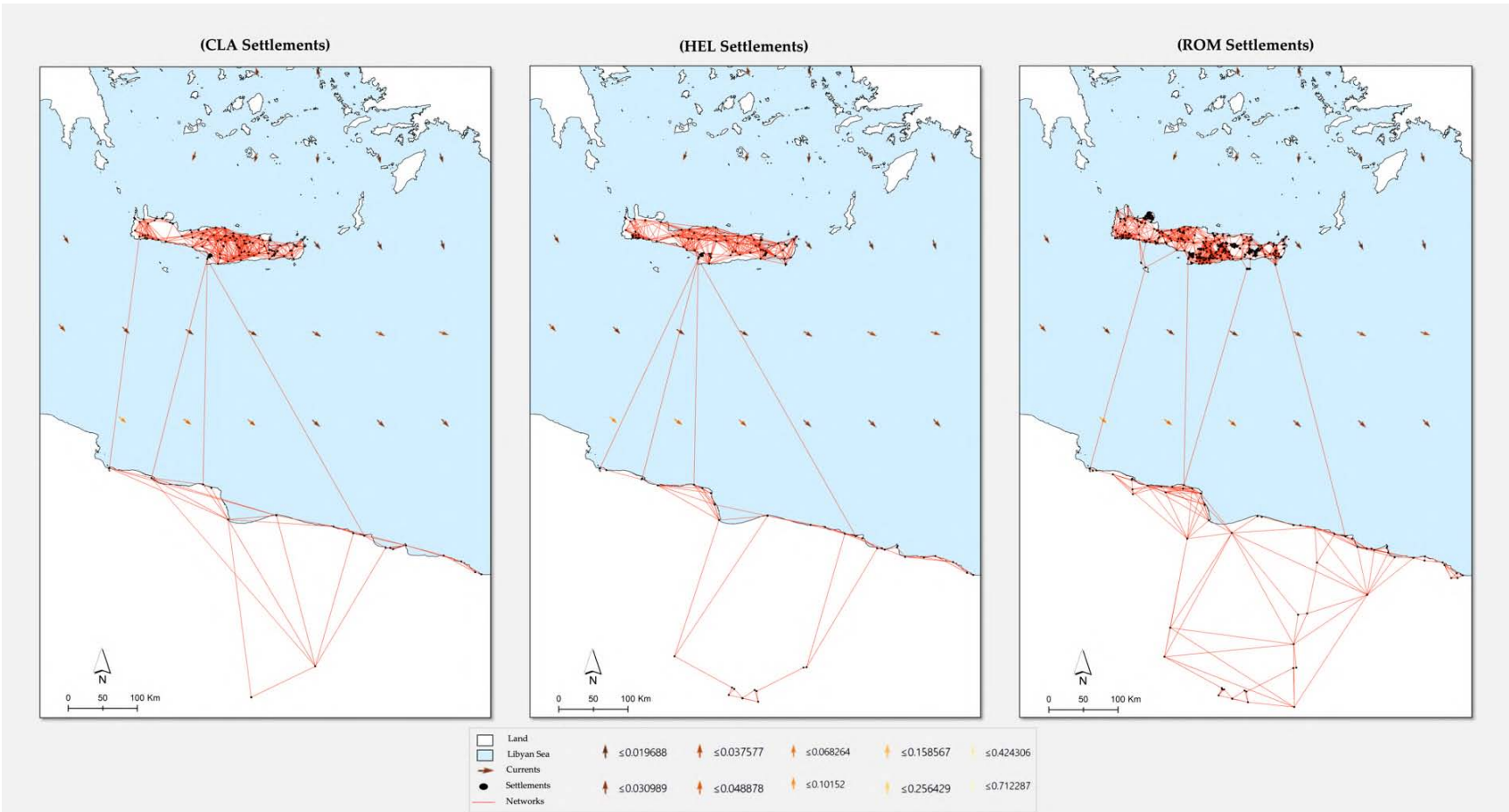


Figura 5.77. Modelo de red GG con distintos niveles de β aplicados al periodo Clásico, Helenístico y Romano.

Tabla 5.9. Resultados tras aplicar el modelo GG y *β-Skeletons*, indicando el número de nodos conectados, enlaces, el grado promedio y la densidad

Temporalities	Scale	Nodes (Settlements)	Edges	Average Degree	Density
LBA	β = 1 (Gabriel Graph)	475	795	3.347	0.0070
	β = 1.5	469	790	3.368	0.0071
	β = 2	475	1253	5.275	0.0111
	β = 3	475	2429	10.227	0.0215
EIA	β = 1 (Gabriel Graph)	307	502	3.270	0.0106
	β = 1.5	301	501	3.328	0.0110
	β = 2	304	780	5.131	0.0169
	β = 3	307	1459	9.504	0.0310
ARC	β = 1 (Gabriel Graph)	321	525	3.271	0.0102
	β = 1.5	315	546	3.466	0.0110
	β = 2	321	854	5.320	0.0166
	β = 3	321	1572	9.794	0.0306
CLA	β = 1 (Gabriel Graph)	200	311	3.11	0.0156
	β = 1.5	198	347	3.505	0.0177
	β = 2	199	533	5.356	0.0270
	β = 3	200	1016	10.16	0.0510
HEL	β = 1 (Gabriel Graph)	142	204	2.873	0.0203
	β = 1.5	136	221	3.25	0.0240
	β = 2	142	356	5.014	0.0355
	β = 3	142	623	8.774	0.0622
ROM	β = 1 (Gabriel Graph)	585	945	3.230	0.0055
	β = 1.5	578	952	3.294	0.0057
	β = 2	581	1490	5.129	0.0088
	β = 3	585	2763	9.446	0.0161

VI

LA IMPORTANCIA DE LA "APERTURA" EN LA INVESTIGACIÓN ARQUEOLÓGICA

VI

LA IMPORTANCIA DE LA "APERTURA" EN LA INVESTIGACIÓN ARQUEOLÓGICA

6.1 CIENCIA ABIERTA (OPEN SCIENCE)

En arqueología, como en otras disciplinas científicas, se han destinado tradicionalmente grandes esfuerzos, en tiempo y recursos a la recopilación de datos a través de trabajo de campo, de laboratorio, colecciones de museos y otras fuentes, seguidos de una descripción detallada, análisis riguroso y, en numerosos casos (aunque en otros muchos no), de la publicación de los resultados e interpretaciones en informes técnicos de excavación, monografías o artículos de investigación. Sin embargo, estas publicaciones representan únicamente una pequeña fracción del extenso proceso que implica el desarrollo de una investigación. Además, es importante reconocer que es común que los datos e información recopilados quedan en muchas ocasiones almacenados "en un cajón", sin acceso público, o solo están disponibles exclusivamente para investigadores/as afiliados a instituciones con suscripciones a revistas y editoriales especializadas, lo que restringe el acceso al conocimiento generado (Marwick *et al.*, 2017). Esta problemática también afecta a las metodologías empleadas, ya que frecuentemente carecen de suficientes detalles sobre las condiciones y procesos en los que se llevaron a cabo. Incluso cuando los datos están disponibles, suele faltar información que explique su origen, propósito y los procedimientos aplicados en su obtención, lo cual limita su interpretación y reutilización.

Aunque este ha sido el modelo tradicional de investigación durante mucho tiempo, en las últimas décadas la ciencia ha experimentado una transformación renovadora impulsada por lo digital, que ha revolucionado las formas en las que se investiga y publica. Ante este panorama, han surgido nuevos enfoques y estrategias para almacenar, gestionar y conectar datos de forma "abierta", así como para integrar información proveniente de distintos ámbitos disciplinarios. Estas prácticas se agrupan bajo el marco de la "ciencia abierta" (*Open Science*), un movimiento que promueve la accesibilidad, la colaboración y la transparencia en la investigación, asegurando una gestión accesible de datos e información en lugar de su posesión restrictiva, la visibilidad de los procesos de análisis en lugar de la opacidad, y la participación pública en lugar de la exclusión. Sin embargo, aunque la ciencia abierta no es algo relativamente nuevo, en la práctica sigue siendo menos común de lo que se esperaría, ya que aún prevalecen modelos de investigación cerrados, que limitan el acceso, la evaluación y la colaboración en la investigación (Lake, 2012; Wilson *&* Edwards, 2015; Marwick *et al.*, 2017).

Por lo tanto, resulta fundamental destacar la importancia de adoptar enfoques de investigación verdaderamente "abiertos" en todos los aspectos relacionados con la gestión, almacenamiento, análisis y difusión de datos y resultados. Esto facilitaría un mayor acceso a los datos y métodos empleados, lo cual tendría un impacto en la confiabilidad y el alcance de las investigaciones. Además, este enfoque no solo democratiza el acceso a la información, sino que también fomenta una ciencia más inclusiva y orientada a resolver problemáticas reales de forma colaborativa y transparente.

En este contexto, Benedikt Fecher y Sascha Friesike (2014) identificaron cinco puntos clave en los que trabajar para avanzar hacia una ciencia verdaderamente abierta: (i) infraestructura, que implica la creación de herramientas y servicios que mejoren la eficiencia de la investigación; (ii) pragmática, centrada en hacer más efectiva la investigación colaborativa; (iii) apertura, que se enfoca en promover una ciencia más accesible y reutilizable; (iv) medición, que busca el desarrollo de métricas alternativas para evaluar el impacto de la investigación; y, finalmente, (v) democracia, cuyo objetivo es garantizar que el conocimiento generado esté disponible de forma libre y accesible, trascendiendo los límites de los círculos académicos especializados y alcanzando a la sociedad en general (Fecher *&* Friesike, 2014).

No obstante, este capítulo no tiene como objetivo abordar cada uno de estos puntos en detalle ni debatir en profundidad sobre los beneficios potenciales de cada uno de ellos en términos generales. En su lugar, se busca proporcionar un marco práctico y aplicable que permita avanzar de manera efectiva hacia la apertura en el proceso de investigación arqueológica. Para ello, el enfoque se centra en explorar algunos de los conceptos clave asociados, así como los procedimientos específicos empleados en esta investigación, la cual se estructura en torno a tres pilares fundamentales: accesibilidad, datos FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable*) y LOUD (*Linked Open Usable Data*), y metodologías abiertas. Estos tres elementos, que se analizarán con mayor profundidad a lo largo de este capítulo, constituyen una base sólida y práctica para avanzar hacia una ciencia más inclusiva, colaborativa y efectiva.

6.2 ARQUEOLOGÍA ABIERTA: DEFINICIONES & CONTEXTO

6.2.1 Sobre el concepto de "apertura"

En las últimas décadas, conceptos como *Open Source, Open Software, Open Access* u *Open Data* se han integrado en el lenguaje y las prácticas de investigación, consolidando un cambio del cual ha surgido un concepto clave: la "apertura." Pero, ¿qué implicaciones tiene exactamente este término? Según Jeremy Huggett (2015: 7), aplicando este principio en el contexto del uso de los datos, "estos se consideran "abiertos" solo si cualquiera puede acceder a ellos y reutilizarlos, con el único requisito de atribuirlos y, en caso de redistribuirlos, hacerlo bajo las condiciones establecidas por su creador original". En este contexto, como se ha expuesto en este trabajo, el formato de los datos está cambiando rápidamente de analógico a digital (Opitz *et al.*, 2021; Turchin *et al.*, 2020). Este cambio ha abierto nuevas posibilidades para gestionar, almacenar y difundir dichos datos; sin embargo, la cuestión de cómo hacerlo de manera eficaz y sostenible sigue estando abierta (Nicholson *et al.*, 2023).

Si se traslada este principio al ámbito de la arqueología, podríamos considerar los datos arqueológicos como "abiertos" cuando conjuntos de datos generados en el transcurso de una investigación se encuentran disponibles libre y gratuitamente para la comunidad académica y el público general (Wilson & Edwards, 2015: 2). A primera vista, esta definición parece clara; no obstante, el verdadero reto surge en la naturaleza y las características específicas de dicho acceso. Esto se debe a que el acceso abierto en arqueología no solo implica la disponibilidad de los datos, sino también la adopción de estándares que aseguren la interoperabilidad, el uso ético y la reutilización

sostenible. Esto requiere, por un lado, la creación de plataformas y repositorios que posibiliten la accesibilidad y preservación a largo plazo de los datos arqueológicos y, por otro, un compromiso con marcos legales y éticos que promuevan un acceso equitativo y uso responsable. Por lo tanto, la naturaleza del acceso es crucial, pues abarca no solo la capacidad de acceder a la información, sino también la de comprenderla, interpretarla y reutilizarla de manera adecuada.

Como sugieren Cristopher Nicholson *et al.* (2023), la transición a un modelo de datos digital abierto en arqueología conlleva importantes desafíos en términos tanto de sostenibilidad a largo plazo como de eficacia en la gestión y el uso de la información. Por tanto, la "apertura" en arqueología va más allá de una mera cuestión técnica vinculada a la accesibilidad y difusión de la información. Los investigadores/as deben trabajar en diferentes aspectos para asegurar que el acceso se haga de acuerdo a unos principios de transparencia, colaboración y reutilización responsables. Además, se debe asegurar que el acceso no quede restringido solo a quienes poseen los recursos y capacidades para interpretar estos datos. Esto implica la necesidad de iniciativas que promuevan la transferencia del conocimiento en un sentido amplio, beneficiando a distintos agentes sociales.

Desde esta perspectiva, la arqueología abierta se caracteriza por una mayor transparencia, visibilidad e impacto de la investigación, ampliando las posibilidades de colaboración e involucrando activamente a la comunidad académica y a la sociedad en general. De esta forma, la apertura se convierte en una herramienta transformadora, haciendo de la arqueología una disciplina más inclusiva, en la que la información y recursos se comparten de

forma generalizada. Esto contribuye a crear una ciencia más accesible, colaborativa y transparente, en la que el conocimiento generado tiene un alcance y valor social más amplio.

Antes de comenzar a definir de manera práctica cómo realizar una investigación arqueológica abierta, es fundamental profundizar en las razones que justifican el porqué de una arqueología verdaderamente abierta. Este capítulo pretende responder a esta cuestión, ofreciendo un marco de referencia que permita entender la relevancia de generar datos y aplicar metodologías alineadas con los principios de apertura, al tiempo que destaca la importancia de combinar diversos tipos de fuentes y datos de distinta naturaleza como parte de un mismo sistema integrado y accesible.

Este último aspecto resulta especialmente relevante, ya que la integración de datos heterogéneos provenientes de distintos tipos de fuentes y formatos es esencial para construir narrativas arqueológicas más completas. No obstante, esta integración implica complejidad, especialmente cuando se incluyen "datos heredados" (*legacy data*) o "literatura gris" (*grey literature*). Para afrontar este desafío, algunos investigadores/as defienden la adopción de principios como FAIR y LOUD (Niccolucci & Richards, 2019), que establecen directrices claras en cuanto a la creación, gestión y diseminación de los datos e información. Estos marcos ofrecen un enfoque estructurado para consolidar una arqueología abierta, proporcionando una base sólida para avanzar hacia una investigación arqueológica que sea no solo más accesible y colaborativa, sino también más ética y responsable.

6.2.2 ¿Qué son la literatura gris y los datos heredados?

En términos generales, el concepto de literatura gris (*grey literature*), también conocida como "fuentes grises", se refiere a aquella "literatura especializada producida a todos los niveles por gobiernos, instituciones académicas, empresas e industrias, disponible en formatos impresos y electrónicos, pero que no está controlada por editoriales comerciales" (Schöpfel, 2006: 67). Amanda Lawrence (2012) acota aún más esta definición al identificar tres elementos fundamentales: la naturaleza de los documentos, las entidades productoras y los canales de difusión. Esta clasificación permite comprender de manera más precisa las implicaciones del término, el cual abarca las siguientes categorías:

- **Tipos de documentos**: Incluye informes técnicos, manuales de procedimientos, archivos estadísticos, actas de congresos no publicadas, entre otros (Childress & Jul, 2003; Schöpfel, 2006; Vaska, 2010).

- **Productores**: Comprende tanto instituciones gubernamentales como no gubernamentales, universidades, centros de investigación y organizaciones de la sociedad civil —i.e., fundaciones, asociaciones sin ánimo de lucro, etc.

- **Criterios de publicación**: Engloba aquellos trabajos que no se ajustan a los estándares de publicación académica o científica convencionales, lo cual ocurre en muchos casos con informes técnicos, publicaciones institucionales o revistas académicas que carecen de un proceso editorial formalizado.

Esta clasificación destaca que estas "fuentes grises" no solo abarcan una gran variedad de formatos y tipos de contenido, sino que también incluyen producciones de entidades diversas y publicaciones que, al no ajustarse a los criterios de editoriales y publicaciones convencionales, presentan retos específicos en términos de accesibilidad, visibilidad y control de calidad. Esto supone un desafío para su uso en investigación, ya que su naturaleza "no controlada" implica complejidad en cuanto a su validación. Sin embargo, estas fuentes pueden proporcionar datos e información valiosa, particularmente en áreas con escasa disponibilidad de estudios formales que aún no han sido ampliamente investigadas.

Por otra parte, el concepto de datos heredados (*legacy data*) se refiere a aquellos datos preservados en formatos no estandarizados, muchas veces similares a los propios formatos que se consideran literatura gris (Allison, 2008). Este tipo de datos plantea una serie de desafíos específicos fundamentales para comprender su gestión e integración en la investigación científica. Entre los aspectos clave vinculados a su naturaleza destacan:

- **Ubicuidad**: Tanto la literatura gris como los datos heredados se encuentran en prácticamente todas las áreas y disciplinas de conocimiento.

- **Accesibilidad limitada**: La dificultad para acceder a este tipo de datos es una limitación recurrente (Schöpfel, 2006). Esta situación se ve agravada en contextos no occidentales, donde tales datos e información suelen estar sujetos a restricciones estatales o políticas cerradas, así como a limitaciones tecnológicas que complican su disponibilidad y acceso (Corlett, 2011).

- **Ausencia de estándares de calidad académica**: Debido a que estos materiales no siempre están sometidos a controles de calidad formales, tales como un proceso de revisión por pares, su fiabilidad puede verse comprometida (Vaska, 2010; Lawrence, 2012).

Por lo tanto, la falta de normas académicas rigurosas vinculadas a este tipo de fuentes plantea dudas sobre la precisión de los datos e información contenida en ellos. Este desafío subraya la necesidad de diseñar y desarrollar estrategias específicas para mejorar la accesibilidad, control e integridad de los datos que provienen de este tipo de fuentes, con el fin de incrementar el valor de su uso en el ámbito de la investigación (Pappas *&* Williams, 2011: 234).

A pesar de los desafíos inherentes, este tipo de fuentes han ganado relevancia en la investigación arqueológica en las últimas décadas, impulsadas en gran medida por la adopción de las tecnologías digitales (Schöpfel, 2006; Vaska, 2010). Así, los enfoques actuales buscan incrementar el impacto de estos recursos mediante mejoras en accesibilidad, validez y preservación (Schöpfel, 2010; Evans *&* Moore, 2014). Este interés, junto con el avance de las tecnologías digitales y enfoques computacionales, ha fomentado que el movimiento de apertura se vincule también a estas fuentes (*Open Source*) (Schöpfel, 2006; Richards *&* Hardman, 2008; Coble, Potvin *&* Shirazi, 2014; Moore *&* Richards, 2015; Crossick, 2016). No obstante, como señala Joachim Schöpfel (2010: 28), "el enfoque en la apertura de datos ha tendido a centrarse en aspectos como el acceso y difusión, más que en la organización de la información". Esta orientación genera un entorno de acceso desigual, en el que los datos son accesibles en teoría, pero no necesariamente abiertos ni sostenibles a largo

plazo, lo cual limita su integración y reutilización de forma efectiva (Faniel *et al.*, 2013; Huggett, 2018). En este contexto, la apertura de este tipo de fuentes enfrenta todavía desafíos significativos para garantizar un acceso constante y preservar su valor como recurso científico.

En el ámbito de la arqueología, los debates sobre la naturaleza, los desafíos y las oportunidades que ofrecen la literatura gris y los datos heredados han cobrado una relevancia creciente. De hecho, el concepto de literatura gris fue adoptado en arqueología poco después de su definición inicial y, desde entonces, la discusión se ha centrado en la gestión y validez de estas fuentes (Cunliffe, 1990; Thomas, 1991). Inicialmente, estos debates giraban principalmente en torno a formatos analógicos, especialmente en Estados Unidos y Reino Unido. No obstante, la transición al formato digital trajo consigo nuevas posibilidades y desafíos, ampliando el alcance y el enfoque de la discusión (Bauer-Clapp *&* Kirakosian, 2017; Richards, 2017). En las últimas décadas, el debate ha experimentado un renovado impulso, orientado hacia las oportunidades que ofrecen las tecnologías digitales para gestionar, preservar y reutilizar materiales inéditos. Estos recursos incluyen, principalmente, informes técnicos, cartografía, imágenes, o fotografías históricas (Evans, 2015). Como resultado, la discusión actual se enfoca no solo en la accesibilidad de estos materiales, sino también en cómo integrarlos eficazmente en plataformas digitales que faciliten su reutilización, impulsando el acceso abierto y su valor para la investigación.

Es importante destacar que los principales desafíos para el uso efectivo de estos tipos de datos en arqueología radican en la ausencia de metadatos —i.e., datos que explican los datos originales— y paradata —datos contextuales que

documentan el proceso y las decisiones involucradas en la creación, modificación e interpretación de los datos—. También se observan problemas asociados a la falta de normas de estandarización en su estructura, la escasez de revisión bibliográfica y control en su presentación escrita, y la carencia de índices y formatos interoperables (Childress *&* Jul, 2003; Schöpfel, 2006; Corlett, 2011; Huggett, 2015, 2018). Este hecho plantea una serie de problemáticas, ya que estos elementos son esenciales para asegurar la fiabilidad, reutilización, archivo y conservación de estos datos de manera adecuada y efectiva (Faniel *et al.*, 2013; Kansa *&* Kansa, 2013). Además, la falta de conexiones entre distintos conjuntos de datos representa otra barrera significativa hacia la interoperabilidad, lo que limita el aprovechamiento de la información para análisis detallados e integrales en el contexto de la investigación (Kansa *&* Kansa, 2013).

Por lo tanto, es fundamental reconocer la necesidad de establecer mecanismos efectivos que permitan reducir la incertidumbre y aumentar la transparencia en el uso de distintos tipos de fuentes y recursos dentro de la investigación arqueológica (Evans *&* Moore, 2014; Fellinger *&* Philpot, 2014; Marchetti *et al.*, 2018; Moore *&* Richards, 2015; Opitz, 2018, entre otros). Este desafío ha motivado a los arqueólogos/as a desarrollar estrategias innovadoras para la gestión y difusión de datos, fuentes y resultados, lo que ha incrementado la conciencia sobre las ventajas de una investigación abierta. Paralelamente, se han impulsado iniciativas orientadas a crear herramientas y establecer estándares que promuevan la apertura, accesibilidad y reutilización. Estos avances apuntan no solo a mejorar la integridad y el rigor en la gestión de fuentes y datos, sino también a facilitar la colaboración y la inclusión en el proceso de generación de conocimiento arqueológico.

6.2.3 Proyectos que aplican enfoques digitales a la gestión de datos

Cabe destacar que esta iniciativa no es exclusiva de esta investigación, sino que se enmarca dentro de una amplia variedad de proyectos que han desarrollado enfoques innovadores en la gestión, almacenamiento y difusión de datos y resultados, con el objetivo de promover una investigación más ética y abierta. A continuación, se presentan algunos de los proyectos que han ejercido una influencia directa en el diseño de este estudio. Si bien se reconoce que la selección está mayormente orientada a casos del ámbito occidental y mediterráneo, también se incluyen ejemplos de otros contextos con el fin de ofrecer una visión más global y representativa. Para ello, el análisis se organiza en tres categorías principales: (i) archivos digitales, que incluyen repositorios y plataformas diseñados para la preservación y acceso abierto de datos arqueológicos; (ii) infraestructuras digitales o ciberinfraestructuras, entendidas como sistemas avanzados para la gestión de grandes volúmenes de datos, promoviendo la interoperabilidad; y (iii) proyectos de investigación financiados, que han facilitado el desarrollo de nuevas metodologías y tecnologías aplicadas al campo arqueológico.

En primer lugar, numerosos proyectos de archivo han adoptado prácticas éticas en la gestión de los datos con el objetivo de fomentar la apertura y accesibilidad en la investigación. Entre los ejemplos más representativos se encuentran el *Archaeology Data Service* (ADS), el *Designated Archaeology Collections Programme*, el *Online Access to the Index of Archaeological Investigations* (OASIS) y/o la red *ARchives of European Archaeology* (AREA). Estos archivos digitales y sus correspondientes sistemas y directrices se orientan a la conservación de datos de naturaleza arqueológica a largo plazo, así como al intercambio y reutilización de estos datos, promoviendo una

arqueología más transparente y colaborativa (Barratt, 2000; Hardman *&* Richards, 2003; Schlanger, 2004; Evans *&* Moore, 2014; Green, 2014).

En segundo lugar, existen otro tipo de proyectos que buscan interrelacionar archivos digitales con publicaciones y datos de campo o conectar diversos conjuntos de datos entre sí. Algunos de los ejemplos más significativos incluyen ARENA, LEAP, DAPPER, NEARCHOS, ARIADNE, tDAR, DANS, *Open Context* y *Pelagios* (Richards, 2002; Faniel *et al.,* 2013; Kansa *&* Kansa, 2013; Moore *&* Richards, 2015; Meghini *et al.,* 2017; https://pelagios.org/; https://www.tdar.org/about/). La mayoría de estos proyectos se pueden clasificar como ciberinfraestructuras (p. ej., ARIADNE), las cuales facilitan el acceso y uso de datos a gran escala, o como redes de investigación que implementan enfoques digitales para promover prácticas éticas y colaborativas (p. ej., NEARCHOS).

En tercer lugar, existen varios proyectos de investigación que están desarrollando enfoques pioneros en la gestión de datos arqueológicos en formatos digitales, influyendo significativamente en la metodología empleada en nuestro estudio. Entre ellos destaca el ya mencionado ORBIS, *Stanford Geospatial Model for the Roman Empire*, que aplica la digitalización y representación en red, superando las limitaciones de los enfoques locales y regionales (https://orbis.stanford.edu/). De forma similar, el proyecto VIATOR-E se dedica a la digitalización y difusión de la red viaria del Imperio Romano de Occidente (http://viatore.icac.cat/), mientras que MINERVA se enfoca en la digitalización de las rutas y en comprender el funcionamiento de la economía romana en el Imperio Romano de Oriente (https://projects.au.dk/minerva). Otros proyectos que trascienden al ámbito

del periodo romano, como *EIDOS of a City*, simulan el colapso y la resiliencia de antiguos entornos urbanos en el Mediterráneo oriental mediante modelos basados en agentes (ABM). Este proyecto ha creado la primera base de datos de acceso abierto sobre antiguos asentamientos en Chipre para un amplio rango cronológico (*ca*. 11000 a.C. al 1878 d.C.) (Crawford & Vella, 2022). Asimismo, el proyecto MedAFRICA ofrece un enfoque sobre la dinámica arqueológica e histórica del África mediterránea, cubriendo una cronología que abarca desde aproximadamente el 9600 hasta el 700 a.C. (https://www.medafrica-cam.org/).

En cuanto a proyectos desarrollados fuera del ámbito occidental y mediterráneo, destacan iniciativas como el ERC *Desert Networks into the Eastern Desert of Egypt*, EAMENA (*Endangered Archaeology in the Middle East and North Africa*), MarEA (*Maritime Endangered Heritage*), MAEASAM (*Mapping Africa's Endangered Archaeological Sites and Monuments*), MAHSA (*Mapping Archaeological Heritage in South Asia*), MAPHSA (*Mapping the Archaeological Pre-Columbian Heritage of South America*) y *CyberSW (Exploring the pre-Hispanic archaeological record of the US Southwest and Northwest Mexico)* (https://desertnetworks.huma-num.fr/; https://eamena.org/; https://marea.soton.ac.uk/blog/; https://maeasam.org/; https://www.mahsa.arch.cam.ac.uk/; https://www.upf.edu/web/maphsa; https://cybersw.org/). Estos proyectos aplican innovadores enfoques digitales a la recopilación, gestión y diseminación de datos e información, mostrando cómo las herramientas tecnológicas avanzadas pueden transformar las prácticas tradicionales en arqueología.

6.3 DATOS & METODOLOGÍAS ABIERTAS EN ARQUEOLOGÍA

6.3.1 Open Data *versus* Open Access

Levent Atici *et al*. (2013) destacan que algunos arqueólogos/as aún muestran cierta reticencia a compartir sus datos, a pesar de las ventajas que ello conlleva. Entre las posibles razones podrían estar la pérdida de control sobre su "capital" —i.e., el tiempo y recursos invertidos—, cuestiones relacionadas con la autoría, el riesgo de un uso indebido, e incluso quizás, en algunos casos, evitar la crítica (Moore & Richards, 2015). Aunque estas preocupaciones son comprensibles y totalmente lícitas, consideramos que no deberían constituir un obstáculo para avanzar hacia un modelo de investigación que fomente la apertura. Si bien es cierto que también existen otras cuestiones relevantes relacionadas con la sostenibilidad económica y las implicaciones legales (Alexander, 2013; Pratt, 2013), que, si bien requieren de especial atención y planificación, pueden y deben abordarse.

Es necesario, por tanto, volver a incidir en la importancia de "abrir" la investigación arqueológica. En primer lugar, porque los datos son un bien público (especialmente aquellos generados con fondos públicos), lo cual implica que deberían ser accesibles (Porter, 2013). Por ello, hacer que los datos sean abiertos tiene implicaciones éticas que, como han argumentado varios autores (p. ej., Marchetti *et al.,* 2018; Wright & Richards, 2018), contribuyen a romper con la dinámica monopolística de la información por parte de algunas instituciones. Además, Nicolò Marchetti *et al*. (2018) subrayan la relevancia de los datos y el acceso abierto desde una perspectiva epistemológica. Uno de los argumentos más convincentes en este sentido es que el acceso parcial a los datos introduce sesgos en la investigación y limita el conocimiento que

generamos (Marchetti *et al.*, 2018). De hecho, otros autores (Atici *et al.*, 2013; Kansa & Kansa, 2013) sostienen igualmente que el intercambio de datos e información permite abordar y reducir estos sesgos, y, por tanto, fortalece la investigación. Asimismo, Moore y Richards (2015) argumentan que la apertura facilita tanto la interacción interdisciplinaria (a través del uso y reutilización de datos) como la transparencia (permitiendo la revisión y reanálisis). Estas dos dimensiones —interacción y transparencia— son esenciales: la primera, porque favorece el desarrollo de una investigación más integral; la segunda, porque promueve el rigor científico (Kansa & Kansa, 2013; Marchetti *et al.*, 2018). En definitiva, los datos y metodologías abiertas facilitan la formación de redes, la comunicación entre disciplinas, y la colaboración entre investigadores/as, potenciando la creación de conocimiento (Pearce *et al.*, 2010).

Llegado a este punto, resulta esencial definir claramente qué se entiende por "datos abiertos" (*Open Data*) en contraste con el "acceso abierto" (*Open Access*). En este sentido, Huggett (2015: 7-8) realiza una clasificación en función del nivel de apertura, destacando las diferencias entre distintos grados de accesibilidad:

1. **Datos de acceso libre**: Este nivel ofrece acceso en línea para consultar conjuntos de datos, limitado únicamente por la disponibilidad de conexión a internet y un navegador. Sin embargo, el uso de estos recursos más allá de la visualización y consulta suele estar restringido, por lo que el acceso queda circunscrito al entorno de visualización y no a la descarga o manipulación directa.

2. **Datos de acceso abierto con información geográfica**: Este nivel permite obtener información geográfica de gran calidad y precisión mediante consultas de búsqueda o a través de servicios como el *Web Feature Service* (WFS), *Web Map Service* (WMS), o el *Web Coverage Service* (WCS), ampliamente usados para análisis y visualización desde los principales softwares SIG. Los WFS permiten la descarga y manipulación de datos vectoriales en tiempo real, como si estuvieran almacenados localmente, mientras que los WMS facilitan la visualización de mapas renderizados. Por su parte, los WCS proporcionan acceso a datos ráster, como imágenes satélite y modelos digitales de elevación (MDT / DEM).

3. **Datos de acceso abierto con restricciones de uso**: Este nivel incluye conjuntos de datos que pueden descargarse, aunque su uso y reutilización están limitados por condiciones específicas. Esto significa que, aunque accesibles, no cumplen con los criterios técnicos de datos completamente "abiertos".

4. **Datos abiertos**: Este nivel no presenta restricciones de uso en los datos, cumpliendo con la definición de apertura total o con las licencias más permisivas de *Creative Commons* (CC). Por lo general, se refiere a conjuntos de datos específicos sobre proyectos, sitios o colecciones que están disponibles para el análisis, modificación y redistribución, permitiendo un uso más amplio en proyectos de investigación.

Por lo tanto, los datos abiertos (*Open Data*) podrían definirse como aquellos que pueden ser utilizados, reutilizados y redistribuidos, generalmente con

restricciones mínimas, como menciona el autor. De ahí que sus características fundamentales sean: disponibilidad y acceso, formato conveniente y modificable, reutilización y distribución, y, por último, participación, es decir, que estén al alcance, sin discriminación alguna (*Open Knowledge Foundation*, 2023). Por otro lado, el acceso abierto (*Open Access*) se centra en la accesibilidad libre y gratuita a datos, publicaciones, código, etc. permitiendo a otros investigadores/as, instituciones y usuarios revisar, evaluar y reutilizar estos recursos. Ambos enfoques —acceso abierto y datos abiertos— son fundamentales para avanzar hacia una arqueología más inclusiva, transparente y colaborativa. Así, el primero facilita el acceso a información arqueológica, mientras que el segundo refuerza la creación y diseminación de datos reutilizables en la investigación.

De este modo, términos que inicialmente parecen similares, como "acceso abierto" y "datos abiertos" no son equivalentes, ya que los niveles de accesibilidad y potencial de reutilización varían en cada caso, y lograr una apertura completa sigue siendo una tarea compleja y, en muchos casos, poco frecuente. Esto subraya la necesidad de adoptar y aplicar nuevos marcos que permitan avanzar hacia una arqueología verdaderamente abierta. En este contexto, existen varias iniciativas que están desarrollando enfoques prácticos y efectivos. Entre ellas, los archivos digitales y las ciberinfraestructuras destacan por sus resultados y aplicabilidad. La principal ventaja de los archivos digitales radica en su capacidad para vincular y almacenar datos dentro de la web semántica, unificando meta- y paradata de manera interoperable (Richards, 2004). Este tipo de proyectos representa un avance en la gestión de bases de datos, literatura gris y datos heredados en arqueología, promoviendo el acceso abierto y la colaboración en un entorno digital. Por su

parte, las ciberinfraestructuras, como ARIADNE, y redes de investigación como NEARCHOS, desempeñan un papel crucial en la arqueología contemporánea debido a su impacto y carácter innovador. Estos proyectos se fundamentan en los principios de datos abiertos, con un enfoque específico en la conservación a largo plazo, la interoperabilidad y la modelización del conocimiento. Para cumplir estos objetivos, emplean ciberinfraestructuras y herramientas digitales, principalmente basadas en la web semántica, lo cual facilita la vinculación, publicación, intercambio y conexión de datos e información en línea de forma accesible y abierta (Green, 2014).

Sin embargo, al trabajar con archivos digitales y ciberinfraestructuras, es necesario considerar ciertos desafíos relacionados con la accesibilidad y la reutilización de los datos. Un obstáculo importante es que una gran parte de estos sigue almacenándose en formatos como PDF, que, aunque ampliamente utilizado, no es ideal para el acceso y la manipulación en contextos de investigación más avanzados (Evans *&* Moore, 2014). Este tipo de formatos limitan la extracción automática de información y la interoperabilidad, lo que dificulta su uso en sistemas de análisis que requieren formatos estructurados y estandarizados. Debido a esto, este tipo de formatos no cumplen plenamente con algunos de los principios básicos de apertura (Thiery, 2019). Esto implica que no todos los esfuerzos para digitalizar y abrir el acceso a la información se traducen directamente en datos verdaderamente abiertos, ya que los formatos y estructuras de almacenamiento no siempre facilitan la reutilización efectiva (Moore *&* Richards, 2015). No obstante, estas limitaciones no deben ser vistas como obstáculos insalvables, sino como áreas de mejora en las que continuar trabajando para asegurar una mayor eficiencia en la gestión. Abordar estas limitaciones implica, por tanto, avanzar en la

adopción de formatos más accesibles y en el desarrollo de prácticas de estandarización que permitan una mejor integración e interoperabilidad (Wright & Richards, 2018).

En conjunto, estas iniciativas destacan que la apertura y la gestión adecuada son fundamentales para el desarrollo de una investigación arqueológica más accesible, inclusiva y éticamente responsable. Este enfoque no solo fomenta la transparencia en la investigación, sino que también promueve una colaboración y acceso más amplio a la información. En este contexto, las tecnologías digitales juegan un papel central al canalizar el potencial de lograr resultados más abiertos y colaborativos, facilitando nuevas formas de interacción, visualización y análisis (Atici *et al.*, 2013; Halperin, 2017; Galeazzi & Richards-Rissetto, 2018; Marchetti *et al.*, 2018).

En este estudio, se han adoptado enfoques digitales y aproximaciones computacionales con el objetivo de desarrollar una investigación que priorice la generación de resultados abiertos, promoviendo el acceso y la reutilización de datos y metodologías. Este esfuerzo implica un compromiso con los estándares y principios que rigen la apertura. Sin embargo, como se ha destacado en este trabajo, la apertura efectiva requiere adherirse a directrices específicas que garanticen la calidad, accesibilidad y sostenibilidad de los datos e información. Entre estos estándares destacan los principios FAIR y LOUD, que no solo promueven el acceso abierto, sino que también aseguran que los datos compartidos sean potencialmente reutilizables. Esto implica cumplir con una serie de directrices o requisitos necesarios para que los datos estén diseñados para una integración e interoperabilidad efectivas.

6.3.2 Principios FAIR y LOUD

Este debate destaca que el valor y el potencial de los datos no depende únicamente de su disponibilidad, sino también de la claridad en su estructura y en la forma en que se presentan. Esto se debe a que, como se ha destacado anteriormente, la falta de normalización en cuanto a definiciones, criterios de registro y métodos de organización puede obstaculizar tanto el acceso como la reutilización efectiva (Atici *et al.*, 2013; Faniel *et al.*, 2013; Huggett, 2015, 2018; Kansa *&* Kansa, 2013). Además, la ausencia de criterios unificados conlleva tanto implicaciones epistemológicas como éticas, y por tanto requiere especial atención (Kansa *&* Kansa, 2013; Milek, 2018; Zwitter, 2014). Epistemológicamente, la falta de consistencia en los datos puede afectar a su calidad y validez. Desde un enfoque ético, la ausencia de normalización plantea interrogantes sobre la responsabilidad en el uso y manejo de los datos, así como sobre la transparencia y la equidad en el acceso a la información.

Ante esta problemática, destacan especialmente las directrices o principios de datos FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable*), que establecen unos pilares básicos para lograr que los datos sean localizables, accesibles, interoperables y reutilizables (Wilkinson *et al.*, 2016). Este marco FAIR se desglosa en una serie de directrices específicas, diseñadas para orientar la organización y gestión de datos de modo que se garantice su plena alineación con los criterios de accesibilidad y reutilización. Además de facilitar el acceso a la información, este enfoque promueve la colaboración interdisciplinaria, ampliando así el alcance y el impacto de la investigación.

En cuanto a los debates actuales sobre los principios de datos FAIR estos se fundamentan en gran medida en los esfuerzos pioneros de "datos enlazados"

(*Linked Data*) —i.e., datos vinculados que se publican bajo una licencia abierta—, un concepto introducido a principios del 2000 por Tim Berners-Lee, creador del *World Wide Web* (WWW). Berners-Lee anticipó el potencial de vincular datos e información mediante las capacidades de interconexión de la red global, estableciendo las bases conceptuales de lo que más tarde se conocería como "datos abiertos" (*Open Data*) (Thiery, 2019). Así, este concepto se fundamenta sobre tres principios fundamentales: (i) garantizar la accesibilidad de los datos (ii) facilitar su reutilización y redistribución y (iii) fomentar la participación universal, permitiendo que cualquier individuo, sin importar su ubicación o recursos, acceda y contribuya a esta red global de conocimiento (*Open Knowledge Foundation*, 2023). Estos pilares o principios, que inicialmente surgieron como un ideal, han evolucionado hasta convertirse en un objetivo ampliamente aceptado. Esto ha tenido un fuerte impacto en la forma en que en la actualidad se accede a la información, se publica y comparte en la web, construyendo progresivamente una estructura global de conocimiento más abierta y colaborativa.

No obstante, para promover una verdadera apertura de los datos, Berners-Lee (2023) propuso el "modelo de cinco estrellas" (https://5stardata.info/es/), un sistema ascendente que establece cinco niveles de optimización en la accesibilidad y conectividad de los datos (Tabla 6.1). Este modelo permite evaluar el grado de interoperabilidad, facilitando una integración de datos cada vez más eficiente en la web. Cumplir con cada uno de los niveles de este modelo implica y garantiza que los datos puedan considerarse *Linked Open Data* (LOD), es decir, datos no solo accesibles para su consulta y reutilización, sino interconectados con otros conjuntos de datos en la red, lo cual maximiza su alcance.

Tabla 6.1. Esquema de los 5 niveles (estrellas) de datos abiertos (*Open Data*).

Nivel	Descripción	Características	Formato
Nivel 1 ★	Datos accesibles en la web en cualquier formato (incluso PDF), pero con baja reutilización	Disponibilidad en la web, accesibilidad limitada	
Nivel 2 ★★	Datos en formato estructurado y legible, lo que mejora la usabilidad	Formato estructurado, mayor facilidad de procesamiento	
Nivel 3 ★★★	Datos en formato abierto y no propietario (como CSV), permitiendo una reutilización sin limitaciones	Formato abierto/no propietario, mayor reutilización	
Nivel 4 ★★★★	Identificación de elementos de datos con URIs únicos, lo que permite la interconectividad	Identificación URI, interconectividad de elementos	
Nivel 5 ★★★★★	Datos interconectados con otros conjuntos de datos, facilitando la integración y máximo aprovechamiento	Datos enlazados, máxima conectividad y utilizable	

Solo una letra diferencia LOD de LO(U)D: la U de "usable" (utilizable). Propuesto por Robert Sanderson (2018), este concepto amplía el de *Linked Open Data* (LOD) al priorizar la creación de datos abiertos que no solo sean accesibles, sino también utilizables por los desarrolladores (Thiery, 2019). En este sentido, LOUD añade cinco principios adicionales (https://linked.art/loud/), de modo que el cumplimiento de los niveles de cinco estrellas de LOD, junto con los cinco principios de LOUD y los

principios FAIR, constituye lo que se considera el "estándar dorado" para la producción y gestión de datos abiertos.

En esta misma línea, recientemente también se ha propuesto el "Modelo de Datos de las Siete Esferas" o "Modelo de las Siete Esferas de Datos" (Thiery, 2019: 4-5) (Figura 6.1). Esta propuesta categoriza la accesibilidad en distintos niveles ascendentes, de modo que la séptima y última esfera se plantea como el enfoque más integral para el tratamiento de los datos abiertos, ya que engloba todos los principios FAIR y LOUD. Todas estas propuestas constituyen marcos de estandarización que contribuyen a transformar los datos hacia una apertura práctica y ética. A continuación, se detallan las características de cada uno de estos niveles:

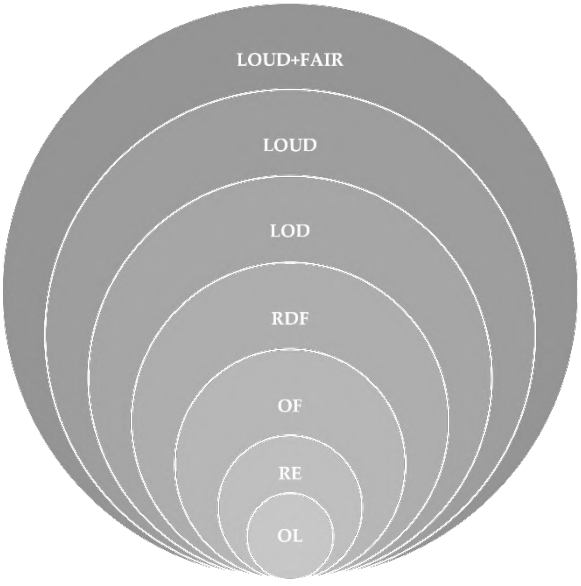


Figura 6.1. Modelo de las 7 esferas de datos (modificado a partir de Thiery, 2019: 5)

1. **OL** (*Open License*): Los datos están disponibles en la web bajo una licencia abierta, lo cual permite su libre acceso. Sin embargo, estos no necesariamente están estructurados ni preparados para ser interoperables.

2. **RE** (*Readable*): Los datos están disponibles en un formato estructurado y legible (p. ej., en una hoja de cálculo), lo que facilita su uso y permite su procesamiento automatizado.

3. **OF** (*Open Format*): Los datos se publican en un formato abierto, estructurado y libre de licencias propietarias, asegurando su accesibilidad y reutilización sin restricciones de formato.

4. **RDF** (*Resource Description Framework*): Los datos se presentan mediante URIs (Identificadores Uniformes de Recursos), lo cual facilita su localización y relación con otros conjuntos de datos.

5. **LOD** (*Linked Open Data*): Los datos están enlazados semánticamente a otros recursos, permitiendo una conexión significativa entre ellos.

6. **LOUD** (*Linked Open Usable Data*): Los datos abiertos y enlazados están disponibles en un formato utilizable según los principios de LOUD, facilitando un acceso y uso eficiente.

7. **LOUD + FAIR**: En este nivel, se integran completamente los principios FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) y LOUD (*Linked Open Usable Data*), alcanzando el máximo nivel de accesibilidad, interoperabilidad y reutilización.

Estas directrices tienen por objetivo no solo mejorar la transparencia y accesibilidad, sino también fomentar una participación activa y equitativa. Los datos se conciben como un "bien común", es decir, como un recurso compartido que debe beneficiar a la sociedad y que, por tanto, deberían gestionarse de manera justa y responsable. Dentro de este contexto, los principios CARE (*Collective Benefit, Authority to Control, Responsibility, and*

Ethics) (https://www.gida-global.org/care) han surgido como un enfoque innovador que incorpora una dimensión social a la gestión de datos, poniendo el énfasis en la equidad y la justicia en el acceso y control de la información (Gupta *et al.*, 2023).

Al reconocer a las comunidades locales y originarias como actores activos y con derechos sobre los datos generados en sus territorios, los principios CARE buscan desplazar el debate más allá de las consideraciones técnicas, centrándolo en las implicaciones sociales. Estos principios proponen que la información obtenida en determinados territorios debe beneficiar directamente a las comunidades involucradas, respetando su autonomía y control. Este enfoque pone de relieve el derecho a definir cómo se recopila, interpreta y utiliza la información, asegurando que sus valores, derechos y conocimientos se respeten en el proceso.

Por tanto, los principios CARE destacan que los datos e información no deben tratarse únicamente como un recurso explotable para beneficio externo, sino que deben gestionarse de manera que promuevan el bienestar colectivo. Así, los principios FAIR y LOUD no deben considerarse en oposición a los principios CARE sino como enfoques complementarios que integran valores técnicos con un compromiso social y ético más amplio (Nicholson *et al.*, 2023). Así, mientras FAIR y LOUD se centran en garantizar la accesibilidad y utilidad técnica, los principios CARE destacan la necesidad de involucrar y respetar a las comunidades locales, asegurando que sus derechos sean parte esencial durante el proceso de desarrollo, gestión y diseminación de los datos e información, fomentando así un modelo de investigación que no solo sea abierto, sino también ético y justo.

6.3.3 Accesibilidad, transparencia y ética en la investigación

Ben Marwick *et al.* (2017: 11) plantean la discusión sobre qué aspectos son realmente esenciales para lograr una práctica verdaderamente abierta en la disciplina. Para responder a esta cuestión, señalan tres prácticas fundamentales: *Open Access* (acceso abierto), *Open Data* (datos abiertos) y *Open Methods* (metodologías abiertas). Tras analizar los dos primeros aspectos en las secciones anteriores, en este apartado se profundiza en el tercero: las metodologías abiertas. Estas abarcan todas las etapas del desarrollo de una investigación, desde el diseño y modelado, pasando por la recopilación y análisis de datos, hasta su representación y diseminación, garantizando en cada fase transparencia, accesibilidad y potencial de reutilización. Este enfoque incluye tanto en métodos empíricos (p. ej., detalles de la toma de datos) como en la modelización computacional (p. ej., proporcionar el código con los parámetros y secuencia de operaciones empleados). El objetivo es facilitar a otros investigadores/as la posibilidad de replicar el proceso de razonamiento subyacente que guía cada decisión, verificando los procedimientos y resultados. Además, exponer el flujo de trabajo a la comunidad investigadora y al público promueve la apertura y transparencia, fortaleciendo la confianza en la investigación.

Este proceso, sin embargo, implica cierta complejidad, ya que requiere considerar aspectos contextuales específicos de la investigación, tales como un conocimiento exhaustivo del área de estudio, la cronología, los tipos de fuentes y recursos disponibles, así como las técnicas, herramientas o software empleados. Este último aspecto está también fuertemente ligado a la influencia de los principios de la ciencia abierta, que han fomentado y popularizado el desarrollo de numerosas aplicaciones de software libre (*Open*

Software). Las metodologías abiertas son, por tanto, esenciales para incrementar la transparencia en los procesos de investigación. Esta necesidad ha originado un amplio debate sobre cómo optimizar la reproducibilidad en distintos campos científicos (Stodden *et al.*, 2016; Wilson *et al.*, 2014), incluyendo el ámbito arqueológico (Marwick, 2016; Marwick *et al.*, 2017), donde la accesibilidad y reutilización se presentan como elementos clave.

Uno de los principales retos de aplicar metodologías abiertas en arqueología radica en encontrar un equilibrio entre personalización y estandarización de formatos y procedimientos. Como se ha señalado a lo largo de este trabajo, los principios de apertura han guiado cada etapa de esta investigación, desde el diseño y modelado de datos, donde la personalización ha sido esencial para adaptar los modelos a las preguntas de investigación específicas de este estudio. Mientras que, también se implementaron formatos estandarizados que facilitan la interoperabilidad y el potencial de reutilización de los datos, permitiendo que estos se alineen con los principios de apertura anteriormente mencionados (véase Cap. III, 3.2.2 Arquitectura de Bases de Datos).

La reproducibilidad ha sido, y sigue siendo, un aspecto fundamental de las metodologías aplicadas en este estudio. Para ello, se ha empleado un entorno de trabajo basado en software accesible y orientado a maximizar la transparencia de los procedimientos aplicados (p. ej., mediante el uso de código en R o Python). Además, se ha priorizado el uso de modelos de "caja blanca" (*white box*), que aseguran que todos los parámetros y secuencias de operaciones empleados sean completamente visibles, logrando procedimientos analíticos transparentes y verificables. Asimismo, se integraron herramientas de software libre como Visone para la representación

y análisis de redes y, aunque en el caso de los SIG también se ha utilizado software propietario como ArcGIS, este ha sido complementado de manera paralela con software libre como QGIS. Esto permite que, actualmente, todos los datos, la información generada y los métodos aplicados en esta investigación puedan ser gestionados y replicados a través de plataformas de libre acceso y gratuitas.

No obstante, las metodologías abiertas no solo abarcan las prácticas adoptadas durante el desarrollo de la investigación, sino también durante el proceso de publicación y diseminación de los resultados obtenidos. Un paso fundamental en esta dirección ha sido la implementación de un servicio web público del proyecto (https://peraia.es/) para facilitar el acceso, consulta y descarga de los datos e información asociados a esta investigación (Figura 6.2). Este desarrollo se realizó mediante la selección de una plataforma como *WordPress*, que ofrece una interfaz intuitiva, segura y escalable. Para promover la apertura y reutilización, los datos se han almacenado en un formato no propietario y fácilmente manejable, como CSV (*Comma Separated Values*). La interfaz de la web, además de proporcionar la opción de descarga directa de los datos, permite realizar consultas generales y específicas a través de herramientas de filtrado, optimizando los procesos de búsqueda. Adicionalmente, se incluye un mapa interactivo creado con la tecnología de Carto (https://carto.com/), con un diseño intuitivo que busca mejorar la experiencia del usuario, proporcionando una forma visual e informativa de relacionarse con los datos. Así, el uso de formatos abiertos y fácilmente manejables responde a la necesidad de maximizar el acceso a los datos y minimizar las barreras técnicas, promoviendo una reutilización eficiente y accesible para usuarios con distintos niveles de especialización.

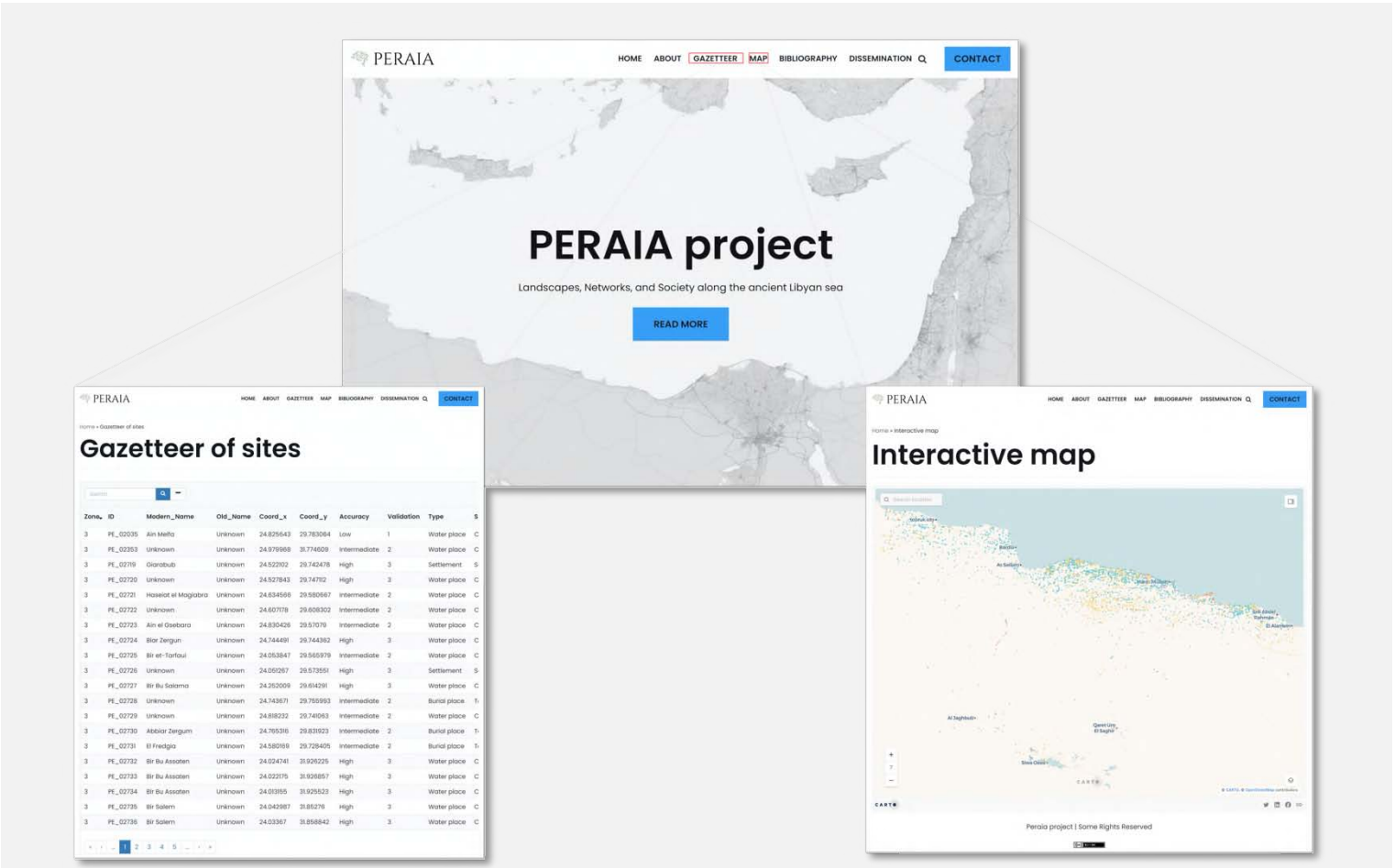


Figura 6.2. Interfaz del servicio web que permite libre acceso a consulta y descarga de datos, junto con la visualización del mapa interactivo.

De manera complementaria, la base de datos y sus metadatos asociados han sido publicados en Zenodo (https://zenodo.org/), un repositorio internacional de acceso abierto desarrollado en el marco de la Unión Europea que garantiza la permanencia y accesibilidad de los datos mediante identificadores de objeto digital (DOI) (Figura 6.3). Esta estrategia dual de publicación, que incluye un URI administrada directamente por este proyecto junto con la asignación de un DOI, proporciona redundancia y reduce posibles problemas de accesibilidad a largo plazo. La adopción de formatos estándar y la asignación de identificadores únicos promueven la interoperabilidad, facilitando el intercambio y ampliando significativamente el alcance y utilidad de los datos e información. En el contexto de estas prácticas, el control de versiones y de calidad de los datos son esenciales para asegurar su coherencia, precisión y reproducibilidad. Por ello, cada registro ha sido sometido a rigurosos controles de integridad y consistencia, verificando tanto los metadatos como las entradas de datos para garantizar la fiabilidad antes de su publicación.

Para promover la reutilización, los datos se han liberado bajo la licencia *Creative Commons Attribution 4.0 International*, que permite su redistribución y reutilización, siempre que se acredite adecuadamente al creador y se respete su uso para *Free Cultural Works*. Esta licencia facilita el acceso y reutilización, al tiempo que garantiza el reconocimiento de la autoría original. Estas prácticas están además respaldadas por la adopción de un modelo de publicación de acceso abierto (*Open Access*) en las publicaciones científicas derivadas de esta investigación. Esta decisión refleja el compromiso adoptado con un entorno de investigación inclusivo y colaborativo, donde los procedimientos y resultados sean accesibles, visibles y puedan compartirse fácilmente de forma generalizada (Figura 6.3).



Figura 6.3. (*Izquierda*) Publicaciones en acceso abierto (*Open Access*) vinculadas a esta investigación, donde se difunden las metodologías y resultados de la investigación. (*Derecha*) Base de datos de los sitios arqueológicos de Marmárica, junto con los metadatos asociados y publicados en Zenodo.

En última instancia, estos enfoques requieren de una reflexión crítica sobre las implicaciones éticas y legales en cuanto a la propiedad, accesibilidad y responsabilidad en la gestión y difusión de los datos e información arqueológica. No cabe duda de que la arqueología, como ciencia que estudia y preserva el patrimonio arqueológico, se beneficia enormemente de un enfoque de investigación accesible y colaborativo. Sin embargo, como destaca Cecilia Smith (2020: 163), "una de las principales amenazas para muchos sitios arqueológicos es su vulnerabilidad ante el expolio y el saqueo, lo que los expone a posibles daños si se divulgan sus ubicaciones." Aunque la evidencia sugiere que este tipo de acciones suele basarse más en redes de conocimiento local que en datos académicos publicados, y que no existe una relación directa entre el acceso abierto y estas prácticas ilícitas, los arqueólogos/as deben considerar éticamente, y en muchos casos también legalmente, la necesidad de proteger estos lugares (Proulx, 2013; Smith, 2005).

En respuesta a esta problemática, este estudio ha buscado un equilibrio entre el compromiso con los principios de apertura y la necesidad de proteger sitios arqueológicos bajo amenaza. Para ello, se han implementado limitaciones en el mapa interactivo que restringen el nivel de zoom, además de utilizar un mapa base que omite hitos topográficos detallados, evitando así la localización precisa de estos sitios. Asimismo, aunque la base de datos es abierta y accesible, se está trabajando en la posibilidad de un sistema de filtrado para la divulgación de las coordenadas, en consonancia con el compromiso de proteger estos lugares. Este enfoque refleja un esfuerzo consciente por adherirse a los principios de apertura y transparencia adoptados, al tiempo que se implementan soluciones efectivas que respeten la integridad y seguridad del patrimonio arqueológico de estos lugares.

6.4 UN EJERCICIO DE PRÁCTICAS FAIR+LOUD EN LA INVESTIGACIÓN ARQUEOLÓGICA MEDITERRÁNEA

Volviendo al contexto de la apertura en el ámbito de la investigación, resulta fundamental avanzar hacia enfoques y estrategias más eficientes para almacenar, gestionar y "conectar" datos. Como destaca Thiery (2019: 2), "para alcanzar esto, los datos deben publicarse ABIERTOS". Así, el objetivo no es solo cumplir con los principios FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) ni únicamente con los principios de *Linked Open Data* (LOD) o *Linked Open Usable Data* (LOUD), sino alcanzar datos que sean los más FAIR y LOUD posible. En esta sección, se realiza un ejercicio de introspección para analizar el estado actual de los datos generados en el contexto de esta investigación en relación con los estándares de apertura y accesibilidad mencionados, valorando en qué medida las prácticas empleadas avanzan hacia una investigación verdaderamente abierta.

Para evaluar la apertura y accesibilidad de los datos, se emplea el "Modelo de Datos de las Siete Esferas" o "Modelo de las Siete Esferas de Datos", propuesto por Thiery (2019: 5). Este modelo permite determinar en qué medida las prácticas empleadas se alinean con los marcos FAIR y LOUD. Este ejercicio proporciona una visión estructurada para situar los datos dentro de estas esferas y evaluar cuántos de los niveles se logran alcanzar. La intención es identificar los ámbitos en los que este trabajo se alinea con estos estándares, así como los aspectos que requieren mayor adaptación para cumplir plenamente con las expectativas de accesibilidad, interoperabilidad y reutilización. A continuación, se establece una relación entre las prácticas realizadas y cada uno de estos niveles:

1. La base de datos completa está alojada en el servicio web (https://peraia.es/), bajo la licencia *Creative Commons Atribución 4.0 Internacional* (CC BY 4.0), que garantiza la redistribución y reutilización del contenido siempre que se acredite debidamente al creador. Además, la base de datos se encuentra en Zenodo, un repositorio abierto internacional que permite gestionar el conjunto de datos y sus metadatos en un formato versionable. Esto garantiza no solo la disponibilidad de los datos, sino también la trazabilidad y actualización, cumpliendo con el primer nivel. Es decir, al alojarse en un servicio web y con una licencia abierta, lo que asegura el acceso libre, promoviendo su visibilidad y reutilización a través de plataformas reconocidas y accesibles.

2. Los datos se han estructurado en un formato tabular accesible, lo que facilita su manejo con cualquier aplicación de hoja de cálculo (p. ej., Excel), garantizando su compatibilidad con herramientas de procesamiento de datos. Esta estructura asegura que sean comprensibles y manipulables para los usuarios sin requerir software especializado. Con ello, se alcanza el segundo nivel, que establece que los datos deben estar disponibles en un formato legible y estructurado, permitiendo una accesibilidad que optimiza su uso y facilita su integración en otros contextos de análisis.

3. El conjunto completo de la base de datos está disponible para su descarga en formato CSV, un estándar ampliamente utilizado y no propietario que permite su uso en diversas plataformas y herramientas sin restricciones de compatibilidad. Este formato garantiza que los datos puedan ser procesados, facilitando su

interoperabilidad. Con esta implementación, se alcanza el tercer nivel, cumpliendo con el requisito de que los datos estén estructurados y accesibles en un formato no propietario, facilitando así su accesibilidad y reutilización.

4. El conjunto de datos completo se encuentra accesible al público mediante dos URI: una administrada directamente por este estudio (https://peraia.es/gazetteer/) y otro mediante el protocolo DOI (https://zenodo.org/records/7678852). Esta dualidad en el acceso asegura que el conjunto de datos sea fácilmente localizable de forma permanente, facilitando así su uso y referencia por parte de otros investigadores/as y usuarios. Con esta implementación, se alcanza el cuarto nivel, que establece que los datos deben ser fácilmente localizables mediante identificadores persistentes y accesibles.

5. Los modelos de datos han sido diseñados con una estructura basada en ontologías y lenguajes semánticos compartidos con otros proyectos de datos abiertos, permitiendo una alineación y compatibilidad que favorece su interoperabilidad y reutilización. La estandarización de los elementos clave en la estructura de los registros asegura que los datos puedan integrarse con otros conjuntos de datos abiertos. De esta forma, se alcanza el quinto nivel, garantizando la disponibilidad y enlazabilidad de los datos en un ecosistema de datos abiertos.

6. El código identificador alfanumérico (DOI) garantiza que los datos puedan ser fácilmente citados y vinculados a otros trabajos, promoviendo su uso y reconocimiento. Además, la disponibilidad de los datos en formato CSV, accesible desde el servicio web facilita su integración por otros estudios e investigadores/as. Así, se cumple con

el sexto nivel, asegurando que los datos no solo estén accesibles, sino también optimizados para su uso práctico y reutilización efectiva.

7. La base de datos, que actualmente contiene más de 5000 registros con información arqueológica e histórica de relevancia, juntos con sus metadatos asociados están orientados a servir a un amplio espectro de usuarios, incluyendo la comunidad científica, administraciones locales y el público en general. A través de su accesibilidad abierta y continua actualización, se permite que estos datos sean revisados y reutilizados, promoviendo la colaboración y el aprovechamiento de los recursos proporcionados. De esta manera, las prácticas desarrolladas se adhieren al séptimo y último nivel, lo que refuerza un fuerte compromiso con la transparencia, accesibilidad y reutilización.

No obstante, en una revisión crítica, aunque la mayoría de las prácticas e implementaciones adoptadas se ajustan al "Modelo de las Siete Esferas de Datos" propuesto por Thiery (2019), se identifican algunas limitaciones. Si bien las prácticas están alineadas con implementaciones desarrolladas en otros proyectos de la región mediterránea y del norte de África, e incluso incorporan elementos de iniciativas como ADS o tDAR, no se han seguido estrictamente los mismos protocolos. Esta circunstancia podría afectar parcialmente el principio de interoperabilidad. Como se indica en el Cap. III, 3.2.2 Arquitectura de Bases de Datos, los datos se diseñaron con el propósito de equilibrar personalización y estandarización. En este sentido, algunos elementos siguen estructuras semánticas y ontologías compartidas, lo que facilita su interoperabilidad y reutilización, mientras que otros se han desarrollado específicamente para reflejar el contexto geográfico y cronológico particular de esta investigación. Así, los datos del primer tipo

están diseñados para ser interoperables, directamente utilizables y enlazables, mientras que los segundos tienen el potencial de serlo. Estas limitaciones no contradicen necesariamente nuestra adscripción a las "Siete Esferas de Datos" de Thiery, pero reflejan los matices y las complejidades técnicas de alcanzar un enfoque verdaderamente global, abierto e interoperable.

Es importante destacar también otras consideraciones sobre el uso de datos y metodologías abiertas en la investigación arqueológica, especialmente en cuanto a su utilidad práctica, repercusiones e implicaciones éticas. En este contexto, la reciente publicación de esta investigación limita la capacidad actual para realizar un análisis exhaustivo de su impacto e influencia. No obstante, hasta la fecha, los conjuntos de datos —integrados en dos plataformas (el servicio web y Zenodo)— han obtenido colectivamente más de cien descargas y miles de visitas, lo que refleja el interés generado por la investigación. Por otro lado, es importante que los arqueólogos/as interesados en este tipo de enfoques tengan en cuenta la complejidad para desarrollar conjuntos de datos de esta naturaleza al diseñar proyectos similares. En este caso, han sido necesarios varios años de trabajo, lo cual ha supuesto una inversión significativa tanto en tiempo como en recursos.

La cuestión primordial, sin embargo, radica en determinar si se actúa éticamente únicamente para cumplir con un principio abstracto o si, por el contrario, se está respondiendo a una necesidad real; ya que adoptar una postura ética vacía resulta, en última instancia, una tarea carente de propósito. Desde esta perspectiva, estos planteamientos son éticos por naturaleza, dado que responden a necesidades reales tanto de la comunidad investigadora como de la sociedad en general. El patrimonio arqueológico y cultural

constituye un "bien común" y, en consecuencia, los datos e información asociados deben ser considerados de la misma manera. Aunque se reconoce que los resultados de este estudio pueden ser de mayor interés para sectores específicos como la arqueología y la gestión del patrimonio, esta investigación exploratoria ha sido concebida para mantenerse accesible a cualquier persona interesada. De este modo, los planteamientos adoptados buscan trascender el ámbito estrictamente académico y extender su alcance al público en general. Por esta razón, se promueve el uso de enfoques abiertos que, por un lado, aseguren que los datos sean más FAIR y LOUD y, por otro, permitan superar las limitaciones que restringen el acceso y el alcance de la información.

En definitiva, el objetivo de este estudio no ha sido únicamente desarrollar una investigación capaz de abordar cuestiones históricas específicas, lo cual ha sido fundamental. Inspirados por los principios de apertura, los esfuerzos se han centrado también en alinear esta investigación con las tendencias actuales que promueven una arqueología accesible, transparente y participativa, enmarcada dentro de los principios de la ciencia abierta. Además, para los defensores de estos enfoques, la apertura debe materializarse en distintos niveles, involucrando no solo a la comunidad académica, sino también a todos los sectores de la sociedad. En otras palabras, la ciencia abierta aspira a la participación de diversos agentes sociales en la creación y difusión del conocimiento, situando a la sociedad en el centro de este proceso. Este planteamiento también debe incorporar la enseñanza de los principios CARE, que promueven la creación y desarrollo de vías para hacer de la ciencia abierta un recurso significativo para diversas comunidades sociales, respetando y atendiendo sus valores, derechos y perspectivas culturales.

VII

ORDERING DATA, NARRATION IN PLAY - LANDSCAPES, NETWORKS & SOCIETY ALONG THE ANCIENT LIBYAN SEA

VII

ORDERING DATA, NARRATION IN PLAY - LANDSCAPES, NETWORKS & SOCIETY ALONG THE ANCIENT LIBYAN SEA

7.1 RATIONALE BEHIND THE DATA(SETS): WHAT KNOWLEDGE DOES IT REPRESENT?

There is a shared conceptualization of the stages that lead to knowledge production. This conceptualization can be defined as the "data-information-knowledge-wisdom" model or pyramid (González-Pérez, 2018). This model is usually seen as a rigid and hierarchical framework: to produce knowledge, you necessarily have to start by generating and gathering data, to later extract information, and finally, knowledge which may then lead to wisdom. This progression implies a strict sequence in which each stage is contingent upon the successful completion of the preceding one, presenting an ostensibly unidirectional pathway toward knowledge acquisition.

This vision, however, entails challenges of different magnitudes and has been subject to critique on several grounds. For instance, Huggett (2015) argues that the model may occasionally operate in reverse or through nonlinear interactions, suggesting that these stages are not as rigidly structured as the model implies. In practical terms, this indicates that rather than a simple, unidirectional progression through each stage, the model can represent a more complex, multidirectional process in which individuals may descend, ascend, in one way or another, depending on the context or objectives. This perspective expands the model's interpretations to allow for greater flexibility

and proposes that knowledge production is not confined to a single, linear upward trajectory but may instead occur through a dynamic interplay between stages.

Critically examined, the structure of the model reveals an even more intricate configuration, one that is less hierarchical and more networked or "rhizomatic" in nature. This term, borrowed from Deleuze and Guattari's (1987) philosophy, captures the interconnected, non-hierarchical, and organic nature of knowledge production as it exists in practice. In this fluid configuration, factors such as ideological stances, theoretical perspectives, and experiential contexts play an influential role in shaping how data is collected, managed, and interpreted (Tilley, 1994; Buccellati, 2017). These factors introduce pre-existing knowledge into the process from the outset, influencing the approach to data and the extraction of information, thereby rendering knowledge production an iterative contextual process rather than a linear ascent.

This reconceptualization posits that prior knowledge influences each stage of the process, generating feedback loops that complicate the traditional model's strict sequentiality. For instance, researchers' theoretical frameworks may predispose them to specific data collection or analysis methodologies, which subsequently shape the nature of information extracted and the resultant knowledge derived. Moreover, novel insights generated through the knowledge creation process can retroactively alter the perception and interpretation of initial data, suggesting a cyclical relationship between stages. This recursive dynamic is represented in Figure 7.1, where the pathways

between stages appear not as a pyramid or linear hierarchy but rather as an interconnected network of influence and feedback.

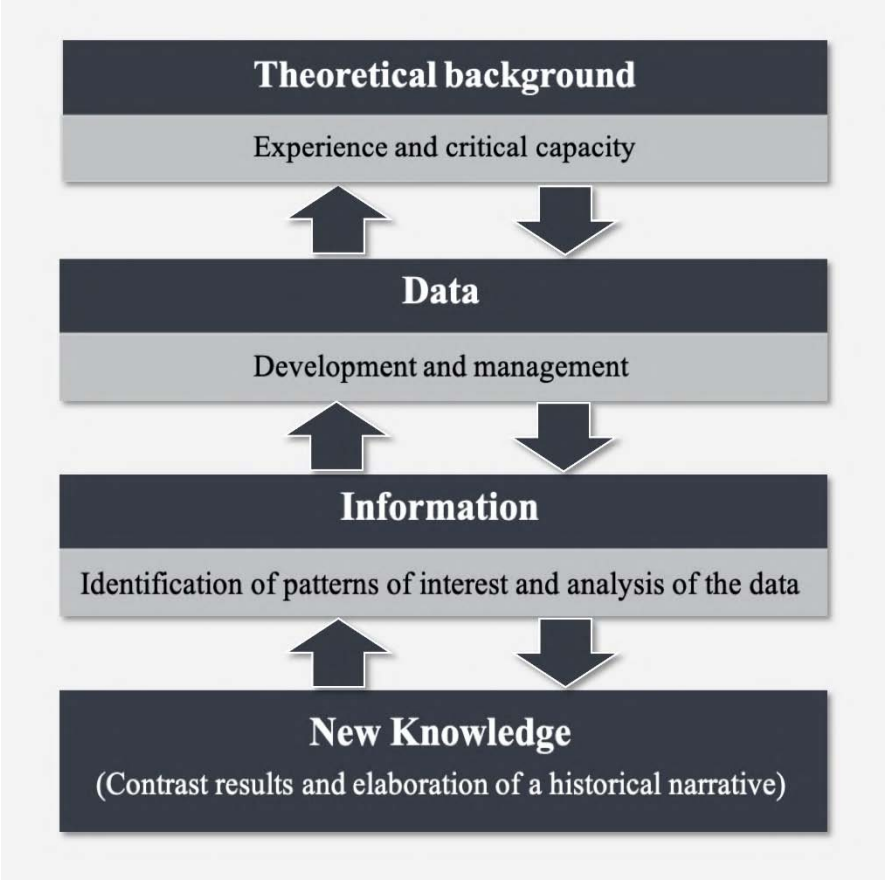


Figure 7.1. Interconnected stages of knowledge production in scientific research.

Ultimately, recognizing the model as a flexible and context-sensitive framework provides a more nuanced perspective in scientific research. This approach accommodates the recursive, reflexive, and adaptable nature of knowledge production, moving beyond rigid hierarchical representations to embrace a model that reflects the complexity inherent in real research processes.

This process, in which the theoretical background influences knowledge production, has also occurred in this case. The theoretical perspectives and prior background actively shape the construction of the data models, the extraction of information, and the interpretation of that information to form new knowledge. This approach underscores that data, by themselves, are not inherently informative. Instead, they only acquire meaning and relevance when analyzed through specific theoretical lenses. Thus, while the datasets contain a wealth of structured, multivariate data —offering insights into regional archaeological heritage, as well as environmental and geographical conditions— the structure and interpretation of these data have been shaped by the predefined objectives. This observation invites a critical reflection on the nature of knowledge generated from datasets, challenging the assumption that data alone, devoid of contextual aims, can independently yield meaningful insights.

An additional critical dimension is the ongoing discourse on the nature, applicability, and inherent uncertainty surrounding the data. This discourse often reveals polarized perspectives, ranging from skepticism about data's objectivity to an overreliance on its apparent empirical authority. Despite this divergence, some scholars (e.g., Buccellati, 2017; Huggett, 2022) seek to mediate these extremes, advocating for a balanced approach that recognizes the subjective influences inherent in data production, while affirming the utility and validity of data within its contextual limitations. In essence, this approach advocates for the legitimate use of data, contingent upon recognizing the production conditions that influence its development. This perspective also underlines the importance of promoting greater openness and responsible utilization in scientific research.

This study aligns with this approach, asserting that it is possible to use significant amounts of data to support interpretations if uncertainty is acknowledged and addressed through transparency and communication. Indeed, this research, due to its exploratory nature, has required large amounts of diverse data to address broad questions, such as: What are the long-term settlement patterns and regional dynamics in the Aegean (Crete) and northeastern Mediterranean African (Marmarica) regions? How do interactions across landscapes contribute to the emergence of societal complexity in these regions? What co-evolutionary dynamics exist between human communities and their environments, and how do these shape historical landscape structures? Through these guiding questions, the datasets facilitate the articulation of a narrative that explores potential interaction flows across these regions —i.e., different "cartographies of movement"— which additionally account for varying environmental and geographical conditions. This narrative, however, moves beyond mere spatial modeling by embedding these interactions within social contexts, suggesting deeper and more complex interconnections.

The data specifically targets features central to understanding historical human-environment interactions. To this end, the recording has focused on key aspects of archaeological evidence, including ancient settlements, productive zones, burial sites, resource catchment areas (e.g., watering places, salt pans, etc.), structures facilitating mobility (e.g., traditional paths, natural corridors); and environmental contextual data such as topography, hydrology, climate, etc. These elements serve as *proxies* for both human processes and potential influencers of ecological patterns. Notably, they highlight areas from which resources, exchange, and trade could be obtained,

thereby delineating potential movement pathways based on socioecological imperatives. As a result, our datasets encompass two primary types of information: archaeological (settlement patterns, interactions, and subsistence activities) and environmental (contextual-interrelationship) data. This framework not only charts potential past interaction flows but, more importantly, identifies the continuous interrelationships between human and non-human factors. This focus on past interconnections across multiple factors aligns fundamentally with the research objectives, enabling a deeper understanding of how past societies interacted with their surroundings in complex and often unpredictable ways.

This multidimensional approach emphasizes that data(sets) are not merely passive containers of facts or isolated points of information; rather, they serve as dynamic *proxies* that actively construct and shape narratives —particularly in this study— around historical human-environment interactions. Consequently, the process of gathering and analyzing data is inherently subjective, with each decision —such as selecting data, structuring the datasets, or applying specific analytical methods— infused with theoretical assumptions and shaped by contextual understanding. These decisions, often informed by the researcher's background, aims, and methodological preferences, determine how data and information are framed. Recognizing this interpretative process is crucial for ensuring transparency and accountability in research, enabling scholars to critically assess the dynamic interplay between data and theory.

7.2 THE CRETAN ARCHAEOLOGICAL LANDSCAPE

7.2.1 Communities in Context: Diachronic Patterns and Regional Trends

This study adopted the concept of the "site" as the primary unit of analysis across various archaeological landscapes. While many contemporary studies prioritize individual artifacts or ecofacts, this approach becomes impractical, if not infeasible, when conducting comparative studies across diverse regions, especially those involving data from multiple archaeological investigations (Knodell, 2021: 37). Defining the site as the central archaeological unit allowed for meaningful cross-regional comparisons and enabled a more cohesive examination of historical human occupation patterns across geographically and contextually diverse areas. Moreover, this approach facilitated the identification of diachronic patterns and regional trends, situating these within a broader analytical framework that underscores the interconnectedness of human and non-human factors across time and space.

Within this framework, "sites" are defined as places that exhibit direct or indirect evidence of human activity from at least one relevant historical period under consideration. This broad delimitation allows for flexible classification while maintaining a focus on detectable human engagement with the landscape. To structure the analysis further, each site in the dataset was categorized according to a typology comprising five primary site types. These include: (i) Settlements, encompassing evidence of habitation ranging from simple dwellings to larger urban centers; (ii) Burial sites, which include individual graves, collective burial grounds, cemeteries, and other structures

associated with mortuary practices; (iii) Productive areas, such as agricultural fields, workshops, and other sites tied to resource production; (iv) Historic resource catchment areas, zones dedicated to the extraction and management of natural resources; and (v) Historic routes, which include ancient roads or traditional paths that facilitated mobility and exchange. This categorization was selected to capture the most significant dimensions of human interaction within the landscape, addressing habitation, subsistence, mortuary practices, resource exploitation, and mobility.

Beyond the physical attributes of individual sites, understanding the concept of "community" requires moving past their isolated characteristics to examine the social and spatial relationships that connect them. In this study, a site's status as a community was evaluated by assessing its connections and interactions with nearby sites, bridging the gap between tangible evidence and interpretations of social organization and interaction. Viewing communities as more than isolated locations provides a valuable framework for interpreting the social dimensions of past human behavior across various archaeological contexts. Here, communities are conceived as cohesive social groups characterized by regular, habitual interactions among their members, facilitated by proximity and shared regions of influence within the surrounding landscapes. This conceptualization provides a foundation for examining how human relationships shaped regional dynamics and influenced the development of larger social structures.

Thus, the concepts of "sites" and "communities" hold distinct but complementary roles in archaeological analysis. Sites are physical remnants —places where artifacts, ecofacts, and structures represent tangible evidence

of past materiality. Communities, in contrast, are interpretive constructs representing the social dimension of these sites and serving as loci of collective human interactions. By combining these two categories, archaeologists can better explore the complex interplay between the material and social dimensions of past human populations, where physical locations are not only points of individual habitation but also integral to the broader social landscapes in which they exist. This dual approach provides a more nuanced understanding of social organization and the spatial dynamics that influenced past interactions. Moreover, it offers a detailed perspective on how individual communities contributed to wider social networks, shedding light on how human groups organized, interacted, and engaged with both their immediate and extended landscapes. Through this lens, sites are not merely isolated points but are understood as interconnected nodes within a network of communities.

Transitioning from this methodological framework, the specific case of Crete offers a valuable context for examining these dynamics in practice. The regional archaeological landscape of the island can be delineated through administrative divisions or broader geographical implications. As previously noted in this work, administratively, Crete is divided into four subregions: Khania, Rethymno, Heraklion, and Lasithi. However, when analyzed from a biogeographical perspective, these areas can be categorized into three major zones: Western Crete (Khania), Central Crete (Rethymno and Heraklion), and Eastern Crete (Lasithi). These zones, interconnected by multiple networks, are shaped by distinctive topographic and environmental attributes that have influenced settlement patterns and human dynamics over time. By applying the analytical framework outlined above, this research can assess how these

subregions' unique characteristics shaped the spatial and social organization of ancient Cretan societies.

Western Crete's boundaries correspond largely to the Khania regional unit, which extends from the western coastlines to the White Mountains (Lefka Ori) in the east (Figure 7.2). The region's rugged terrain, characterized by steep mountains and deep gorges, creates a natural division between coastal and inland zones. These geographic features historically fostered relative isolation and self-sufficiency among communities, while simultaneously providing natural defenses. Nonetheless, the presence of natural and built harbors along the coast facilitated active maritime trade and interaction, as evidenced by ancient sites such as Khora Sfakion, Loutro (*Phoenix*), Tarrha, Lissos, Palaiokhoria, or Kydonia. These harbors underscore the subregion's historical significance as a node within broader Mediterranean networks.

On the other hand, the distribution of urban centers further inland highlights patterns of agricultural and social organization shaped by the interplay between the environment and human activities. Particularly in the northwestern corner of the island, extending from Polyrrhenia in the west to Aptera in the east, the fertile coastal plains between the Gramvousa, Rodopou, and Akrotiri peninsulas were crucial for sustaining agricultural activities and long-term human occupation. These plains served as focal points for the establishment of settlements, providing the resources necessary for stable subsistence and supporting complex social and economic structures, as evidenced by extensive archaeological evidence (Raab, 2001).

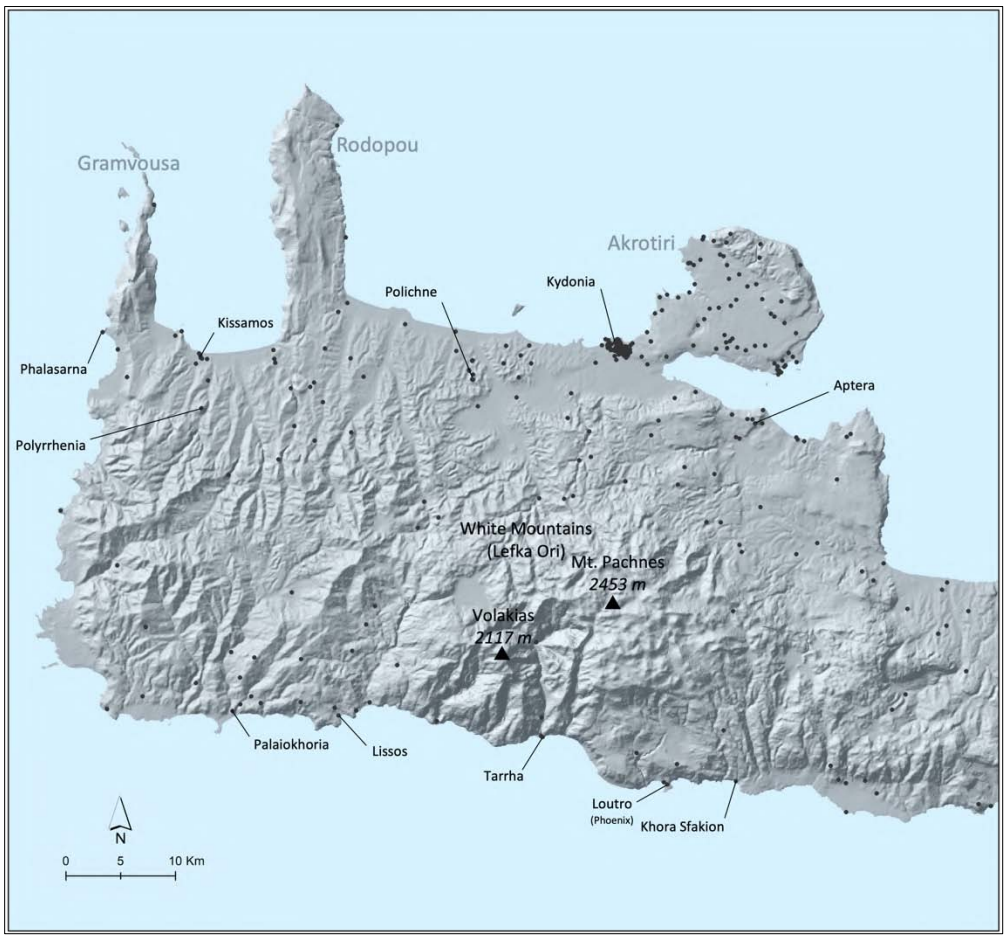


Figure 7.2. Map of western Crete (Khania) boundaries, illustrating the locations of ancient sites referenced in the text.

Moving to **Central Crete,** this subregion encompasses the regional units of Rethymno and Heraklion, bounded by the White Mountains (Lefka Ori) to the west and the Dikti Mountain to the east. The northern coastline faces the Cretan Sea, featuring natural bays and coves that have facilitated maritime activity and cultural exchange over millennia, with Knossos and its periphery serving as a significant urban center. From this central region, relatively accessible lands extend to the southeast, where the expansive alluvial plain of the Messara is located —the largest continuous tract of arable land in Crete and of particular significance for this study (Figure 7.3).

The Messara is bounded by mountain ranges to the north, east, and south (the Asterousia Mountains function as a natural barrier between the Libyan Sea and the inner central parts of the island), and broadens out to a coastal fan on the west where the Ieropotamos river flows into the Libyan Sea. The Late Hellenistic city and Roman capital of Gortyna controlled the area from a central location on the plain, but in earlier periods, the territory was divided among several urban centers. These include Agia Triada and Phaistos, which dominated the western end of the plain and benefited from proximity to both the sea and inland agricultural resources, facilitating regional integration and supporting an interconnected system. The relatively open terrain of this region also rendered it susceptible to external influences, as evidenced by the archaeological evidence of foreign goods and architectural styles, in the port at Kommos (Watrous, 1985, 1992; Johnston, 2005; Day *et al.,* 2011; among others), the primary receptor of contacts with the Libyan-Egyptian coast (Wachsman, 1987, 2010; Tartaron, 2013; Gheorghiade *&* Spencer, 2024; among others). This dynamic interaction highlights how central Crete functioned as a critical hub for internal cohesion and external exchanges throughout the periods considered.

Overall, central Crete's boundaries, comprising fertile plains, accessible coastlines, and mountain ranges, established a microregion that was both productive and strategically protected, which has historically facilitated high levels of socioeconomic and sociocultural development. This evolving landscape has enabled the formation of concentrated settlement areas and extensive agricultural production, supporting communities with substantial interaction within and beyond the island, ultimately shaping Crete's historical

identity as a cultural and economic center within the Eastern Mediterranean context.

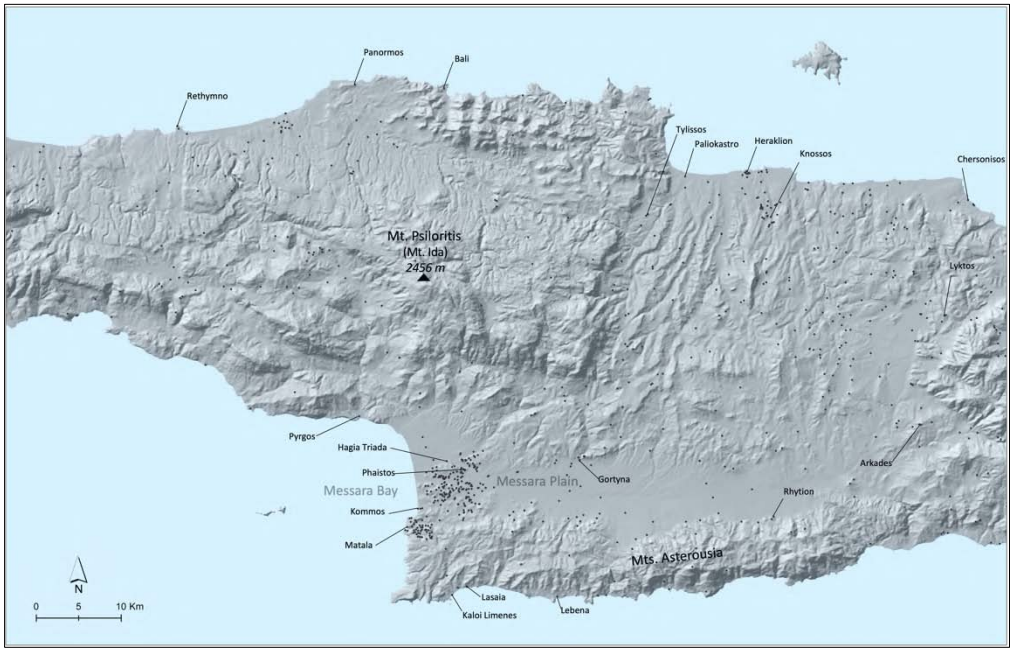


Figure 7.3. Map of central Crete (Rethymno and Heraklion) boundaries, illustrating the locations of ancient sites referenced in the text.

Eastern Crete, encompassing the Lasithi regional unit, stretches from the Dikti Mountain in the west to the island's easternmost extremity. The mountain range forms a natural western boundary, separating eastern Crete from the more accessible plains and coastal areas of central Crete. This region is characterized by its rugged topography, including the Lasithi Plateau. Circumscribed by mountains, the plateau stands out as a fertile and protected agricultural zone that has historically supported human occupation. Conversely, the coastline of eastern Crete is distinguished by a combination of cliffs, bays, and coves that provide essential natural harbors, similar to those in other subregions of the island.

The subregion's diverse topography significantly influenced interactions among its settlements. These include coastal sites such as Malia, Sissi, Milatos, Mochlos, Pacheia Ammos, Siteia, and others (Figure 7.4). Their spatial distribution reveals a complex organizational structure, reflecting patterns of long-term human occupation and adaptive settlement strategies. The intricate relationship between natural features and human activity highlights how eastern Crete's geography shaped not only localized subsistence strategies but also broader patterns of connectivity. Furthermore, the proximity to strategic maritime routes, facilitated by coastal sites such as Ierapetra (*Ierapytna*), Kato Zakros, Palaikastro, or Itanos, enabled a consistent influx of goods and cultural influences, functioning as regional hubs for trade and exchange. These sites became focal points that linked inland communities to wider Mediterranean networks.

Collectively, these evidences underscore the subregion's role as a significant socioeconomic and sociocultural node on the island, with extensive connections during the periods under study. Eastern Crete's unique geography, combining rugged mountains, fertile plateaus, and strategic coastal sites, created a landscape conducive to diverse settlement patterns, agricultural practices, and cultural development. These conditions not only supported local and regional interactions but also positioned eastern Crete as a critical link within the trade networks, anchoring the subregion within the broader Eastern Mediterranean connections.

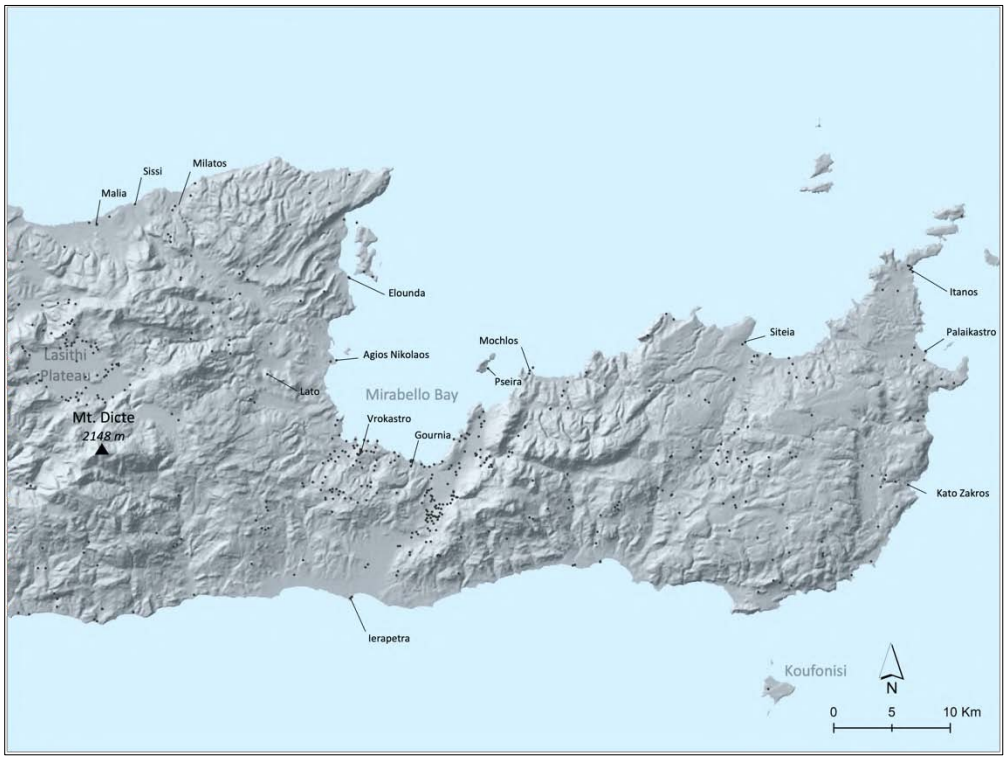


Figure 7.4. Map of eastern Crete (Lasithi) boundaries, illustrating the locations of ancient sites referenced in the text.

This regional overview, based on the study of site locations and their contextual environments, has revealed significant spatial patterns, highlighting the non-random nature of historical site placement and human occupation on the island. The analysis further suggests the existence of meaningful relationships between site distributions and environmental, social, cultural, and economic factors. The following discussion critically evaluates the approaches and methodologies employed to investigate these questions, with a focus on interpreting the results and exploring their broader implications for understanding the Cretan archaeological landscape.

Initially, the application of Kernel Density Estimation (KDE) provided a nuanced understanding of spatial distribution by highlighting the high- and low-density areas of archaeological sites across Crete. KDE has proven to be an effective approach for identifying concentrations of archaeological evidence, as its heat-mapping visualizations capture density variations and reveal localized clusters. The results point to archaeological areas including Khania, Heraklion, Messara, and Mirabello Bay, where site density suggests that these zones were historically significant. However, KDE has limitations; it does not reveal causation —i.e., the capacity to identify the underlying reasons or factors responsible for the observed patterns of site density distribution. Thus, while KDE is useful for visualizing and identifying where clusters occur, it does not provide insights into the causal factors behind those clusters. To explore causation, further analysis is necessary to uncover the underlying reasons (e.g., environmental, social, or economic factors) driving these patterns.

Concurrently, Ripley's *K* function provided valuable insights into the extent of clustering *versus* randomness in site locations. The significant deviation from the Complete Spatial Randomness (CSR) baseline, where observed densities exceeded expected densities at all scales, confirmed a clustering tendency. These results reinforce the hypothesis that sites were not randomly located but rather organized based on specific factors. Notably, Ripley's *K* function revealed interactions at multiple spatial scales, suggesting potential layers of connectivity ranging from localized communities to broader regional networks. This multiscale perspective provides a robust framework for interpreting site distributions in Crete, pointing to interconnected systems rather than isolated patterns.

The Hopkins-Skellam test provided additional quantitative evidence of the clustering tendency, with a statistically significant p-value rejecting the null hypothesis of randomness. A clustering index significantly below 1 further substantiated the assertion of a non-random distribution of sites, highlighting their concentration in specific areas. The convergence of these results provides a high degree of confidence in the conclusion that archaeological sites on Crete demonstrate a clear tendency to cluster in particular areas. However, as with other methods, these approaches share the limitation of not directly correlating the underlying causes with the observed patterns. To address this constraint, the results of Ripley's K function and the Hopkins-Skellam test are most effectively interpreted in conjunction with complementary methods capable of identifying and specifying causative factors.

Percolation analysis added another dimension by modeling connectivity dynamics specifically among Cretan settlements, with significant implications for understanding past interconnections. This approach revealed key thresholds across increasing spatial radii at which settlements transitioned from isolated clusters to cohesive communities, offering a novel perspective on spatial organization, and enabling the inference of maximum distances for effective interaction. At radii of approximately 8-9 km, settlement clusters coalesced, suggesting that this range represents a potential boundary for localized socioeconomic and sociocultural activity. Within this range, settlements likely maintained close ties, facilitating effective resource sharing, agricultural cooperation, and social cohesion. Moreover, this distance corresponds with the practical expected range for daily travel, particularly given the island's rugged topography and the reliance on pre-modern transportation.

Concurrently, the emergence of a dominant, singular cluster at approximately 20 km suggests the existence of a larger, regional network. This result implies that settlements within this radius were integrated into broader systems, where central hubs likely played a critical role in facilitating resource redistribution, trade, and exchanges. These regional networks illustrate an evolving hierarchy of settlement organization, with central hubs functioning as key nodes that connected localized clusters into cohesive and interdependent systems.

The transition from smaller, localized clusters to a dominant regional network also highlights the increasing social complexity of Cretan societies. This shift suggests a gradual evolution from small-scale, community-driven networks toward more centralized systems capable of managing regional interactions. These patterns align with historical evidence of the development of urban centers, such as Knossos or Gortyna, which served as administrative hubs, facilitating trade, governance, and cultural exchange within their regions. These results underscore how Cretan settlements were strategically organized to balance local subsistence needs with regional and interregional integration, reflecting both practical adaptations to the island's topography and broader sociopolitical and socioeconomic motivations.

Although percolation analysis effectively models connectivity and suggests that specific radii represent meaningful thresholds for interaction, interpreting these radii requires caution. The results are subject to inherent limitations, as they require the integration of a broader range of factors and variables to accurately reconstruct ancient terrains and connectivity infrastructures. While this analysis offers a valuable framework, its utility

could be enhanced by incorporating additional parameters. Such integration would enable a more holistic understanding of interrelationship dynamics and provide deeper insights into the interplay between natural and anthropogenic processes.

Further analysis of settlement locations and distributions in relation to key variables, such as productive areas and historical transit routes —specifically, known traditional paths and FMN corridors— provides compelling evidence that settlement patterns were significantly influenced by proximity to strategic resources. Cost-distance analysis of productive zones demonstrates that settlements were concentrated within high-density productive areas, indicating that accessibility to these resources was a critical factor in determining settlement locations. This conclusion is further substantiated by the observation that the majority of settlements were situated within a 2-hour travel distance from productive zones, thereby minimizing transportation costs and enabling more efficient resource management.

Similarly, the proximity to historic routes and modeled mobility corridors (FMN) confirms that transport networks significantly influenced settlement locations. Both types of routes are associated with low cost-distance values, exhibiting a high density of settlements within a 2-hour travel range. Furthermore, the congruence observed between known historical paths and FMN-derived corridors validates the reliability of these simulated mobility structures, as they capture comparable patterns in settlement proximity and spatial accessibility. These results suggest that the FMN methodology can effectively reconstruct ancient mobility networks, offering valuable insights

into connectivity even in the absence of direct archaeological evidence for historic pathways.

Statistical analyses (Kolmogorov-Smirnov, Z1–Z2 Berman, Receiver Operating Characteristics, and Area Under the Curve) corroborated the significant association between settlement distributions and specific variables. Notably, the cost-distance from productive areas exhibited a strong correlation across all statistical tests, reinforcing the critical role of resource accessibility in determining site locations. Moreover, ROC and AUC analyses highlighted the high discriminative power of these variables, with proximity to resources and the density of productive areas emerging as the most predictive factors for settlement placement. Additionally, the integration of transit routes not only improved accessibility to these productive areas but also linked otherwise isolated settlements, promoting trade, resource distribution, and cultural exchanges across the island.

Critically, the methodological approach employed in this study offers a valuable multi-scalar and diachronic perspective on ancient Cretan settlement patterns. However, there remains significant potential for further refinement. Future research could enhance the robustness of these models by integrating a broader range of environmental and anthropogenic variables, including additional topographic features, the variability and productivity of agricultural zones, historical infrastructure, and other socioeconomic and environmental factors. Such refinements would contribute to the development of a more holistic and nuanced model of ancient settlement determinants.

Ultimately, these advancements would further elucidate the complex mechanisms underlying the ancient Cretan system while establishing a transferable methodology for analyzing similar organizational structures in analogous archaeological contexts. Although further research is necessary, this study lays a solid foundation with a robust set of preliminary results. It presents compelling evidence that ancient Cretan settlements were strategically situated, influenced by a combination of human and environmental factors, including resource accessibility, environmental conditions, and mobility networks.

By integrating spatial analysis, accessibility metrics, and cost-distance models, this study provides a more comprehensive framework for understanding ancient Cretan societies, wherein environmental and social factors are inextricably linked in shaping archaeological landscapes. This approach underscores the dynamic relationship between ancient communities and their environments, illustrating how each influenced other in an ongoing, interactive and reciprocal process. In this context, "environmental affordances" refers to natural resources or geographic features that provide advantages, such as fertile soil or defensible terrain. Conversely, "human agency" encompasses the actions of individuals or groups, such as agricultural practices, political motivations, or trade networks development. Together, these factors shaped the evolution of societies and their interactions with the environment in ever-evolving ways. This interplay underscores that settlement patterns were not mere passive responses to environmental constraints; rather, they were also deeply informed by sociocultural, political, and economic priorities, portraying the landscape as a co-creation of both natural and cultural processes.

7.2.2 Mobility and Networks: Traversing Scales

The regional patterns of site distributions discussed above establish a baseline for understanding long-term settlement dynamics across Crete, spanning from the Late Bronze Age to the Roman Period. This timeframe captures significant transitions in sociopolitical and socioeconomic structures, highlighting the evolving patterns of human settlement and interactions. Nonetheless, as John D. S. Pendlebury noted in the 1930s "It is most important when considering the distribution of sites at certain periods to look at the means of communication each had with its neighbours; whether easy access from one quarter has caused a site to favor in this style of pottery the technique of another which may lie at a considerable distance from it; through what sections would pass the traffic, influencing perhaps one group of sites..." (Pendlebury, 1939: 7). Consequently, an effective way to approach Cretan communities is through modeling potential ancient pathways and interactions networks, considering the landscape as well as known traditional routes, and historical accounts. Within this framework, the focal mobility network (FMN) methodology, combined with network science approaches, has proven instrumental in reconstructing past movements and connectivity, offering insights into the landscape's features and its role in shaping social connections. This section reflects on the methodological framework deployed, its outcomes, and its broader implications for understanding the connectivity and organization of historical mobility and sociospatial interactions in ancient Crete.

Building on this, the FMN modeling identified natural pathways that likely channeled past movement trajectories across the ancient Cretan landscapes. These corridors represent areas of preferential mobility, offering the least

resistance to movement based on a cumulative analysis of cost surfaces. By integrating diverse variables, the resulting models highlighted the interplay between topography, hydrography, and other factors in determining ease of travel. The raster-based outputs illustrated the spatial configuration of these pathways, revealing high-potential routes that align with known traditional routes and suggesting new areas of interest for further research.

In this way, this study identified several primary mobility corridors with varying levels of accessibility. As outlined earlier, two major mobility axes were detected: (i) The first follows an east-west trajectory along the northern coastline, linking key areas including Khania, Heraklion, Sissi, Agios Nikolaos, and Mirabello Bay, and extending to the easternmost regions of Sitia. (ii) The second connects the northwestern part of the island with the Messara plain and extends along the southern coast until Ierapetra, and from there reaches the eastern zones. Overall, coastal pathways offered relatively lower friction and thus facilitated exchange, trade, and communication. The exception is the south-central region, where the Asterousia Mountains act as a natural barrier. In this area, mobility was concentrated through the Messara plain, a strategic zone connecting the interior and coastal regions, where natural corridors such as valleys, plains, and mountain passes served as critical conduits of past movements.

From a historical perspective, these identified mobility axes underline the importance of accessibility in shaping the distribution and development of sites on ancient Crete. Major urban centers, such as Kydonia, Knossos, Malia, Phaistos, Gortyna, Ierapytna, or Gournia, are strategically located along these primary mobility corridors. This correlation suggests that proximity to

accessible routes was a decisive factor in the growth of these communities. The enhanced connectivity facilitated by these corridors likely supported economic activities, social interaction, and cultural exchanges, contributing to the sociopolitical complexity observed in these areas during the analyzed periods. The emphasis on accessibility also provides insights into the spatial organization of settlements, suggesting that historical populations strategically utilized natural corridors to optimize communication and resource distribution. Thus, the observed patterns of mobility indicate that the rugged landscape of Crete served not only as a constraint but also as an enabler of connectivity and interaction, thereby shaping the island's sociocultural and socioeconomic trajectories.

A critical advantage of the FMN methodology lies in its emphasis on destination points rather than predefined archaeological sites as origins. This shift provides a flexible framework for exploring mobility without limiting the analysis to specific starting locations, enabling a holistic representation of movement potential across the entire study area. This approach highlights the role of landscape features in directing flows. Consequently, the reconstructed routes transcend temporal boundaries, offering a diachronic perspective that accounts for changes in settlement patterns and societal organization over time. The diachronic nature of the results ensures that the identified corridors are not reliant on the availability of archaeological data for specific periods, thereby establishing a robust foundation for comparative analyses.

Although these results provide a comprehensive framework for understanding ancient mobility across Crete, certain challenges persist. Future research could expand the scope by incorporating additional data and

considering a broader range of variables to further refine the models. Additionally, the quality of the results is inherently tied to the resolution of the digital elevation model (DEM), the density of destination points, and the cost function employed. In this study, the use of high-resolution DEMs, the Naismith rule function, and uniformly distributed destination points across the entire island proved critical for achieving detailed reconstructions.

Furthermore, while FMN routes provide a plausible reconstruction of ancient mobility on Crete, it is important to acknowledge that these models are hypothetical constructs rather than direct archaeological evidence. They do not fully account for potential changes in route utility over time or the influence of specific sociopolitical factors. Although the consistency between historically known and modeled routes is noteworthy, the results should be cross-validated with field evidence wherever possible. Additionally, comparative studies with other Mediterranean regions could offer valuable context, situating the mobility patterns observed in Crete within a broader regional framework.

At the second level, the application of a network science approach to the study of ancient Cretan connections has yielded significant insights into the spatial and relational dynamics of historical settlements and their connective infrastructure. Through the evaluation of metrics such as degree centrality, closeness, and betweenness, the analysis identified the multifaceted roles played by nodes (e.g., settlements, key connection points) and edges (e.g., routes, mobility corridors) within these networks. This analysis revealed a nuanced “big picture” of how these elements structured and influenced

patterns of communication, exchange, and social interaction within the ancient Cretan landscapes.

The first analytical approach, centered on the overall network structure, emphasized the specific roles of individual routes within the network's dynamics. Utilizing flow accumulation values and the sDNA (Spatial Design Network Analysis) toolkit, the analysis quantified topological key network metrics previously mentioned. These metrics allowed for a nuanced understanding of the connectivity, strategic importance, and accessibility of routes at different spatial scales. (i) Degree centrality: This metric highlighted the overall connectivity within specific radii (20 and 50 km), identifying intersections or crossings with the highest concentration of connections. Weighted by flow intensity, degree centrality underscored how certain routes facilitated high levels of circulation, making them essential for maintaining the network's coherence. (ii) Betweenness centrality: The analysis of betweenness centrality was pivotal in identifying key corridors within the network. These routes, frequently used as intermediaries connecting different parts of the network, emerged as critical to its stability. Their disruption could fragment communication and exchange, illustrating their centrality in maintaining the network's integrity. (iii) Closeness centrality: By focusing on accessibility, this metric provided insights into routes that enabled rapid and direct mobility across the network. These metrics underscored the importance of certain pathways in optimizing connectivity and fostering direct interactions between different zones. Collectively, the results revealed a comprehensive picture of the historical mobility networks in Crete, delineating the strategic corridors and routes that optimized both local and regional connectivity. These features likely had profound implications for the

island's sociospatial dynamics, influencing patterns of interaction, communication, and territorial development over time.

At a more in-depth analytical level, the examination of centrality measures at the node level offered a complementary perspective on the functionality of the system. The key approaches can be summarized as follows: (i) Nodes as strategic points: Nodes with high centrality were identified as pivotal for maintaining network efficiency and cohesion. Their removal or disruption would significantly impair mobility flows and interaction patterns, underscoring their critical role in ensuring the continuity of the network. (ii) Edges as essential connections: The analysis of edges highlighted the significance of specific connections in facilitating accessibility and regional integration. These strategic links not only ensured effective communication between nodes but also served as conduits for wider socioeconomic interactions and exchanges. This dual-level analysis of nodes and edges was instrumental in uncovering the internal dynamics of Crete's mobility network. It demonstrated how these structural elements functioned to enable interaction, thereby reflecting historical patterns of societal organization.

The results highlight the pivotal roles played by specific routes, nodes, and edges in shaping patterns of mobility, communication, and exchange. Notably, central Crete encompasses the majority of the strategic land corridors and accessible pathways identified through centrality measures, offering compelling evidence of a well-integrated system designed to support the island's socioeconomic and sociocultural functions. The fertile plains of central Crete, combined with its proximity to key urban centers, positioned this region as a natural nexus for trade and communication, effectively

connecting the eastern and western parts of the island. However, it is essential to incorporate maritime connections (cabotage) into the analytical framework. These maritime networks facilitated the movement of goods and people between coastal settlements, effectively bridging otherwise isolated regions and enhancing the overall connectivity of the island. This analysis also underscores the resilience and adaptability of these historical networks. The interplay between highly connected nodes and strategic routes reveals a system optimized for both stability and efficiency. This aligns with the prominence of significant multi-period urban centers such as Knossos, Phaistos, and later Gortyna, which emerged within these interconnected areas. These centers functioned as hubs for governance, resource distribution, and cultural exchange, leveraging strategic land corridors to maintain their influence over both nearby and distant settlements.

The subsequent step involved an endeavor to comprehend how settlement landscapes interconnect and cohere, as well as how these aspects evolve over time. The concept of connectivity between settlements further enhanced our understanding by elucidating the connections and linkages between locations where archaeological evidence has been found. These sites not only represent loci of past human occupation but also serve as focal points for understanding the movements, exchanges, and interrelationships that shaped complex social landscapes. Connectivity spatial models aid in identifying the flow of people, goods, and ideas, underscoring the significance of both physical spaces and social networks that extend beyond them. Additionally, implementing multi-scalar and temporal adjustments to account for alterations in interaction networks or sociopolitical centers evidenced the evolution of sociospatial organization in response to changing socioecological and historical

circumstances. This approach involved the application of diverse spatial network models, including K-Nearest Neighbors (K-NN), Maximum Distance Networks (MDN), Relative Neighborhood Networks (RNN), Gabriel Graphs (GG), and β-skeletons. Each of them provided unique but complementary insights into the dynamics of settlement interactions and spatial organization.

The K-NN models revealed hierarchical proximities that represented patterns of local and regional connectivity, revealing the settlements that consistently demonstrated centrality in terms of proximity. The heterogeneous distribution of settlements across regions in Crete resulted in notable asymmetries in network configurations. For instance, densely populated areas (e.g., Khania, Messara, Heraklion, and Mirabello Bay) exhibited higher clustering tendencies, wherein connections formed cohesive subnetworks. In contrast, sparsely distributed settlements displayed fewer edges and often relied on intermediary nodes for broader connectivity. This observation aligns with archaeological theories positing that geographically proximate communities likely maintained substantial interactions.

The MDN approach established diverse interaction thresholds, incorporating an absolute distance limit for connections. This model suggests that certain settlements, such as Kydonia, Rethymno, Knossos, Malia, Kommos, Gortyna, Ierapytna, Gournia, Mochlos, or Palaikastro, functioned as regional hubs due to their strategic locations within critical distance thresholds, thereby facilitating opportunities for trade, communication, and the dissemination of cultural practices. Additionally, variations in distance thresholds enabled the identification of potential bottlenecks in the network, where key nodes played a pivotal role in maintaining overall connectivity.

The RNN and GG models enhanced contextual flexibility in analyzing connections and provided nuanced perspectives on relational dynamics by considering the density of surrounding nodes (settlements). These approaches proved particularly effective in identifying settlements with strategic advantages based on their positions relative to nearby nodes. Specifically, nodes with minimal competition within their "influence zones" emerged as pivotal centers for facilitating local and regional interactions, including Kydonia, Knossos, Kommos, Mochlos, or Palaikastro. The GG model, with its criteria for excluding intervening nodes, offered a more precise delineation of key edges that likely supported enduring relationships among settlements.

Finally, β-skeletons provided variable density and network structure, facilitating the exploration of network connection density and reach, elucidating a spectrum of potential interaction scenarios. Lower β values indicated denser networks with high redundancy in connections, suggesting resilience to perturbations. Conversely, higher β values highlighted more sparsely connected networks, wherein critical nodes could be identified as potential vulnerabilities. This flexibility underscores the adaptability of β-skeletons for modeling diverse intensities and scales.

The spatial networks modeled in this study provide substantial evidence supporting theories of interaction and centrality within ancient Cretan societies. Many of the key settlements previously mentioned consistently emerged as central nodes, indicating their roles as hubs for trade, communication, and sociopolitical influence. The hierarchical structure revealed through K-NN and MDN models aligns with archaeological

evidence of settlement stratification, suggesting that certain sites likely served as administrative, economic, or cultural centers. Furthermore, the adaptability of models such as RNN and GG underscores the importance of contextual flexibility in understanding ancient interactions. Settlements that appeared peripheral in some models emerged as critical intermediaries in others, highlighting the multi-scalar nature of connectivity on ancient Crete. Lastly, the β-skeleton models demonstrate the utility of exploring different densities of interaction, which can inform discussions about the resilience of these networks to disruptions and changes.

Critically, this study demonstrates the utility of a structured methodological framework that combines advanced computational tools, including the integration of Python scripting with GIS allowing for the automation and optimization of complex data workflows, ensuring a robust and transparent process. These computational approaches were critical for managing the diverse datasets, including digital elevation models (DEMs), cost-friction layers, and more. The use of different techniques to model ancient pathways, coupled with a detailed consideration of slope gradients and topographic features, provided a nuanced understanding of the conditionals that shaped historical mobility. Additionally, the spatial networks models facilitated the identification of sociospatial interactions across different scales and temporal contexts, aligning these interactions with the unique features of Cretan landscapes. Nevertheless, it is possible to enhance these models by incorporating additional variables or by combining spatial and network models with methods such as agent-based modeling (ABM) simulations, which could further elucidate the processes underlying the observed patterns and offer dynamic insights into the evolution of these systems over time.

7.2.3 Societies in Transition

The study of the Cretan archaeological landscape, particularly through a site-based approach, provides a nuanced understanding of diachronic settlement patterns and regional dynamics across Crete's diverse subregions. This approach, which contrasts with artifact-focused analyses frequently employed in regional studies, directly engages with the challenges of comparing varied archaeological datasets spanning different periods. Conceiving a "site" as any location evidencing human activity —whether through physical artifacts, ecofacts, or inferred interactions— and classifying these sites based on their primary function (e.g., settlements, burial sites, productive areas, resource catchment zones, or historical routes), this study provides a structured yet adaptable framework for interpreting patterns of human occupation and connectivity. Furthermore, the site-based framework not only supports comparative analysis across Crete's distinct geographic and cultural landscapes but also highlights the functional and social roles of individual communities as integral components of larger, multi-scalar networks. This section synthesizes these results, contextualizing them within a broader historical and archaeological context and identifying key areas for further exploration.

The analysis demonstrated that settlement locations were not randomly distributed but were closely linked to specific geographic, economic, and mobility-related factors. Advanced geospatial and statistical analyses identified proximity to productive areas and historic routes as consistently decisive factors. Settlements tended to cluster near resource-rich areas and along significant mobility corridors. Thus, Crete's favorable geographic and environmental conditions, including fertile plains, resource accessibility, and

its strategic position within mobility networks played a pivotal role in the spatial distribution of ancient settlements. These patterns underscore the importance of trade, resource management, and communication in shaping ancient Cretan societies.

Nevertheless, a more in-depth examination revealed subtle nuances and temporal shifts in settlement organization, reflecting the complex and evolving relationship between human and environmental factors. Period-specific analyses have been instrumental in elucidating how these patterns transformed in response to shifting conditions, offering insights into the adaptive strategies employed by Cretan societies. This approach not only enhances the granularity of our understanding but also facilitates a dynamic reconstruction of the coevolutionary interplay between human and non-human factors and settlement dynamics on Crete from a long-term perspective. These patterns underscore significant episodes of reorientation and adaptation in human habitation, which this discussion seeks to contextualize within historiographical frameworks.

The initial stages of the Late Bronze Age (LM IIIA-B) represented a peak in settlement organization, characterized by a preference for low-lying, fertile, and coastal environments. This environmental orientation reflected a settlement system that emphasized agricultural productivity, trade, and access to maritime networks. Settlements were often located in areas with significant tracts of cultivatable land, suggesting a focus on agricultural intensification and surplus production. This period's distinctive settlement patterns likely reflect both the stability of centralized political structures and the economic integration of Crete within broader trade networks. However,

the characteristics that rendered these settlements advantageous —low elevation, open plains, and coastal proximity— may have made them susceptible to disruptions, such as environmental stressors, economic fluctuations, or external threats. These vulnerabilities contribute to the contextualization of certain changes observed in subsequent periods.

The LM IIIB-C transition exemplifies such significant changes and represents a critical juncture in settlement distributions, characterized by widespread abandonment of lowland and coastal settlements in favor of more elevated, inland, and defensible locations. This shift, frequently associated with increasing insecurity and fragmentation, underscores the significance of environmental affordances in influencing settlement locations. This phenomenon, evidenced in the analysis, aligns with the interpretations of Nowicki (2000), Watrous, Chatzē-Vallianou & Blitzer, (2004), and Pollard (2022), among others. Elevated sites offered strategic advantages for defense and subsistence, as well as access to diverse ecozones, as observed in other studies of Cretan topography (e.g., Watrous, 1974; Gaignerot-Driessen, 2016).

The Early Iron Age (PG-G) was characterized by progressive settlement nucleation, as populations consolidated into larger, more centralized communities. While some settlements persisted from the LM IIIC period, many smaller sites were abandoned in favor of larger, more accessible centers. These emerging centers were often strategically located to optimize access to resources and communication networks. The term "nucleation phenomenon," as defined by Wallace (2010), reflects an ongoing reorganization of sociopolitical structures during this time. Larger settlements likely functioned as hubs within emerging political and economic networks,

representing efforts to reconstruct and stabilize following the disruptions of the LM IIIB-C transition (Pollard, 2022). During this period, these urban centers often occupied strategic locations, facilitating communication, resource accessibility, and defense, as observed in studies of the Messara Plain (Watrous, Chatzē-Vallianou & Blitzer, 2004) and the Bay of Mirabello (Gaignerot-Driessen, 2016).

The Archaic period signifies the commencement of a more stable and organized settlement system, as city-states (*poleis*) began to dominate the landscape. This period reflects a notable shift toward greater sociopolitical organization and territorial consolidation. However, the clear distinctions between settlement patterns of the Archaic and earlier periods likely reflect that the sociopolitical and economic systems of the Archaic period evolved from the foundations laid during the Early Iron Age, rather than representing a direct continuation of LBA dynamics (Sjögren, 2003, 2007; Pollard, 2022).

The Classical and Hellenistic periods witnessed a continuation of the gradual shift back toward lowland and coastal environments, accompanied by increasing urbanization and the emergence of more complex settlements. Urban centers came to dominate the landscape, reflecting the consolidation of political and economic systems. These periods demonstrate the full integration of Crete into broader Mediterranean socioeconomic and sociopolitical systems. The reoccupation of coastal areas underscores the renewed importance of maritime trade, while the growth of urban centers highlights the increasing complexity of social and political organization (Sanders, 1976, 1982; Raab, 2001).

During the Roman period, settlement patterns became increasingly aligned with broader Mediterranean trends, characterized by widespread lowland occupation and extensive utilization of coastal plains. A significant increase in settlement density and infrastructure development reflected the stability of Roman Crete. New settlement trends were observed following the Roman administration: several sites on the plain periphery relocated from their former defensive positions to lower elevations, small rural sites became more numerous, and some of these occupied bottomlands, suggesting more intensive land use. These dynamics continued to be significant in Late Roman times; however, a potential decline in the number of rural settlements is proposed, albeit tentatively, as numerous sites are not precisely dated (Sanders, 1976; 1982; Raab, 2001; Watrous, Chatzē-Vallianou & Blitzer, 2004; Chevrollier, 2016).

However, this analysis requires a more complex narrative. Similar to Pollard's (2022) hypothesis about the inland reorientation during the LM IIIB-C period, which marks a significant departure from the low-lying settlements of LM IIIA-B, the results also suggest a flexible adaptation to local and regional topographic settings. This adaptability likely reflects localized responses to regional pressures, including the need for access to critical resources, the optimization of agricultural potential, and the maintenance of community connectivity, which are not completely uniform throughout Crete. Such patterns underscore the complex nature of settlement strategies and highlight the importance of further research to unravel the interplay between environmental constraints, sociopolitical structures, and cultural practices that shaped these dynamics.

To exemplify such local and regional dynamics, we turn to the western Messara plain, where data collected primarily from the investigations by Watrous, Chatzē-Vallianou, and Blitzer, (2004) provide comprehensive historical and archaeological documentation of settlement patterns. Their work offers precise periodizations and detailed descriptions of the archaeological assemblages characterizing sites from each period. In this context, although the shifting patterns discussed above are relatively present in this area, the data revealed a previously unrecognized level of rural activity across all periods analyzed. This development began during the Late Bronze and Early Iron Ages, with the establishment of small settlements and individual structures scattered across the plain. Site numbers increased in subsequent periods, particularly during the Classical period, when the majority of sites were identified as small suburban agricultural establishments featuring evidence of both domestic and imported pottery, reflecting a growing integration of rural production within broader economic networks. By the Hellenistic period, site numbers had doubled, displaying a wider distribution and a more complex settlement hierarchy that included the large center of Phaistos, numerous small settlements, and individual agricultural establishments. These changes highlight the dynamic interplay between expanding rural activity, the development of regional centers, and evolving socioeconomic structures over time.

Phaistos was largely abandoned in the second century BCE following its destruction and annexation by Gortyna, as previously mentioned, the primary urban center during later periods connected to ancient harbors such as Matala and Lebena. Nevertheless, there was a reduction in sites nearest the city, but most rural sites in outlying areas remained occupied in the Roman

period, with some new agricultural establishments identified as well. The settlement hierarchies previously observed appear to persist during these later periods. Pottery assemblages comprise domestic wares, amphorae, and local and imported fine wares, with a significant increase in the latter compared to earlier periods. Finally, a marked decline in site densities is observed beginning in the fourth century CE, with only one-quarter of the former number exhibiting evidence of Late Roman occupation (Sanders, 1974, 1982; Raab, 2001; Watrous, Chatzē-Vallianou & Blitzer, 2004).

At a secondary interpretative level, the application of spatial network modeling to investigate hypothetical interactions and topological distributions of ancient settlements across distinct historical periods has yielded significant insights into Cretan sociospatial dynamics. By analyzing patterns of connectivity, centralization, and adaptation, this study underscores those settlements functioned not as isolated entities but as integral components of dynamic, interconnected landscapes. This approach further enhances the understanding of how these communities interacted, adapted, and evolved within their diverse environmental and social contexts. The results highlight the complex interplay between human agency and broader environmental forces in shaping settlement patterns, providing a nuanced perspective on the coevolution of Cretan societies across both temporal and spatial scales.

Consequently, the spatial networks reflect a clear evolution in the organization and connections of settlements across periods. (i) During the LBA, the networks balanced local and regional connections, indicating subsistence-level interdependencies alongside broader integration driven by

economic and cultural exchanges. The networks displayed relatively high local density and key nodes (e.g., Kydonia, Knossos, Phaistos, or Gournia areas) that acted as hubs for both local and extended interactions. (ii) In the transition to the EIA, a notable decline in overall connectivity and density at higher spatial thresholds suggests network contraction or reorganization. Despite the reduced number of nodes, local density increased, reflecting tighter reliance on immediate neighbors likely driven by organizational changes. (iii) The Archaic period marked the stabilization of node counts with restructured connections, indicating cohesive networks that facilitated regional integration, probably linked to socioeconomic and sociopolitical growth. (iv) This trend continued into the Classical period, where networks showed increased centralization and density, particularly at broader scales, reflecting the emergence of dominant urban centers and structured socio-political frameworks. (v) In the Hellenistic period, the networks became densely interconnected at all scales, emphasizing heightened centralization around fewer, strategically important settlements. This pattern aligns with the broader Hellenistic tendencies toward urbanization and territorial control. (vi) In contrast, the Roman period exhibited an increase in the number of nodes alongside reduced density, suggesting a sprawling yet network. Enhanced long-distance connectivity, driven by Roman infrastructures, facilitated Crete's integration into broader a system.

From these analyses, distinct patterns of connectivity emerged across different spatial scales and temporal contexts. Local networks, persisted throughout all periods, underscoring their role in maintaining societal cohesion through subsistence activities and immediate community connections. Regional networks gained prominence during periods of

political and economic expansion, enabling resource consolidation, trade, and exchange. Long-distance interactions initially limited to specific connections, became increasingly significant in later periods, driven by political centralization and advancements in infrastructure, which enabled more efficient communication and trade.

In conclusion, this exploratory research underscores the evolution of Cretan settlement distributions and interaction networks, reflecting shifts in complex socioecological and historical dynamics across distinct periods. The early periods (LBA–EIA) revealed settlement patterns and networks that balanced local subsistence strategies with broader regional and interregional interactions, suggesting a resilient society adapts to navigating both external disruptions and internal transformations. The subsequent periods (ARC, CLA, HEL) were characterized by increasing centralization and a growing emphasis on regional and long-distance interactions. These changes reflect the emergence of more hierarchical sociopolitical systems and the growing integration of Cretan communities into wider economic and cultural spheres. Finally, the last period (ROM) underscores Crete's integration into expansive political economies, aligning with broader Mediterranean trends. Despite this, the nuanced dynamics at multiscale levels reveal complex, adaptive patterns shaped from local needs to regional integration and necessitate further investigation. Nonetheless, this study provides an initial robust framework for understanding the island's sociospatial evolution and demonstrates the value of integrating spatial analysis with archaeological network research to explore historical human-environment interactions.

7.3 MARMARICA IN ITS AFRICAN CONTEXT

7.3.1 Making Practices Visible: Sites and Regional Dynamics

The site distributions and settlement patterns in ancient Marmarica, spanning from the Late Bronze Age to the Roman Period, provide a compelling case study for understanding the resilience of human-environment interactions in arid landscapes. The region's ecological characteristics, such as water scarcity and limited arable soil, created a distinctive setting in which communities adapted through complex and dynamic strategies. This section explores the interplay between environmental stressors and human adaptive capacity, highlighting resilience as both a theoretical framework for understanding these processes and an observable phenomenon in practice.

Resilience, in this context, is not merely a measure of ecological or cultural persistence but a multi-scalar system reflecting the interdependence of environmental, social, cultural, and economic factors. In the case of Marmarica, archaeological evidence suggests a combination of adaptive practices, knowledge systems, and infrastructural-technological developments, particularly advanced water management techniques (e.g., cisterns, terraces, and channels) alongside a high degree of population mobility. These strategies revealed how communities managed constraints by diversifying practices and resource utilization, ensuring flexibility in both settlement and mobility patterns. Additionally, the analysis of these practices, —water harvesting and mobility—, provides insight into how daily activities were informed by collective knowledge transmitted and refined over generations and was integral to maintaining these practices, illustrating the

depth of communal understanding of arid environments. This perspective bridges temporal and spatial scales, providing a lens to examine the responses of Marmarican communities to socioecological and historical challenges.

Tracing the settlement patterns of these communities has been inherently complex, as they did not conform to a strictly sedentary mode of life. The dichotomy between nomadic and sedentary populations has long been a focal point in studies of arid landscapes (Khazanov, 1984; Cole *&* Atorki, 1998; Barnard *&* Wendrich, 2008; Nielsen, 2017; among others). In Marmarica, however, this binary distinction fails to fully capture the reality of its inhabitants. Archaeological evidence indicates that mobility and sedentism functioned as complementary strategies rather than mutually exclusive modes of life, varying in response to environmental and social conditions (Nielsen, 2017; Rieger, 2019, 2023). Thus, both practices coexisted within a dynamic system, mediated by shared access to resources, trade, and exchange networks.

Nomadic groups in Marmarica utilized mobility as a strategy to exploit dispersed grazing lands and navigate the region's diverse climatic conditions. Their capacity to migrate with herds in search of pasture and water exemplifies a crucial adaptive mechanism in arid environments. Conversely, sedentary communities, predominantly located in coastal areas, established semi-permanent settlements in regions with higher precipitation and employed advanced water management systems to support small-scale agriculture —a practice also observed in inland oases. Therefore, the distinction between these groups was often less definitive. For instance, numerous sedentary communities also engaged in pastoralism, while

nomadic groups likely established temporary encampments near agricultural areas during periods of resource abundance or trade. These strategies enabled populations to mitigate constraints associated with aridity and resource scarcity. Sedentary agricultural settlements provided a stable foundation for food production, while the mobility of nomadic groups functioned as a buffer against localized resource depletion. This symbiotic relationship is evident in the archaeological record, which demonstrates evidence of shared infrastructure, such as water management systems, and overlapping utilization of strategic places (Snape, 2013; Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Vetter *&* Rieger, 2019; Rieger, 2019, 2023).

A significant underlying idea from this assumption is the reliance on mixed life strategies as a foundation. The integration of pastoralism, small-scale agriculture, and trade networks allowed ancient Marmarican communities to navigate the inherently harsh environment. This diversity not only buffered communities against environmental shocks but also fostered interdependence among settlements, creating a network of resource-sharing and knowledge. In addition, these practices highlight the importance of flexibility in settlement patterns, as evidenced by niche dwellings and seasonal mobility — i.e., small, specialized habitation sites strategically located to maximize resource exploitation in specific areas, such as near water sources, fertile soil, seasonal grazing lands or traditional paths—, which enabled communities to exploit resources across a broad geographical area, sustaining human occupation over millennia (Rieger, 2019, 2023).

Focusing on the analysis of site distributions in this region, Marmarica (northeastern Libya/northwestern Egypt) is geographically bounded by the

Jebel Akhdar (Cyrenaica) to the west, the Qattara Depression (Egypt) to the east, the Mediterranean Sea to the north, and the Great Sand Sea (Libyan Desert —Sahara in its northeastern parts) to the south. Administratively, Marmarica is divided into two subregions: western Marmarica (northeastern Libya) and eastern Marmarica (northwestern Egypt) (Figures 7.5 and 7.6). Both subregions exhibited ecological conditions in antiquity that were broadly similar to those observed today. Nonetheless, from a biogeographical perspective, as mentioned earlier in this work, Marmarica can be further categorized into five distinct ecological zones: the Northern Fringe (comprising the Coastal Zone and Northern Tableland), Pre-Marmarican Plain, Northern Marmarica (or Libyan) Plateau, the Marmarica Plateau, and the Central Marmarica Plateau, which extends to the desert margins (Vetter, Rieger & Möller, 2013; Rieger, 2019; 2023). Each of these ecological zones is characterized by unique topographic and environmental attributes that have significantly influenced settlement patterns and human dynamics throughout history.

Archaeological evidence additionally highlights significant patterns in the adaptation and management strategies of ancient communities across these zones. This evidence indicates the interplay between environmental constraints, resource availability, and human agency, emphasizing how ancient communities utilized and optimized natural resources to sustain livelihoods and establish networks. A central aspect identified is the pivotal role of water-harvesting systems in shaping settlement patterns, regional dynamics, and socioeconomic structures. Accordingly, this study has focused on documenting cisterns, channels, and cultivated terrace systems on lateral valley slopes and tableland plains as historic resource catchment zones. These

elements were analyzed alongside productive areas and traditional paths, collectively underscoring the technical sophistication and adaptability of these communities.

These archaeological features, many of which date back to the second millennium BCE, provide advanced insights into the region's topographical, ecological, and social dynamics, reflecting a long-term strategy for environmental management. Moreover, geomorphological features such as *wadis*, alluvial fans, and lateral valley slopes played a crucial role. These elements were utilized not only for subsistence agriculture but also as part of a broader economic framework, facilitating sustained rural production and resource exchange. The presence of these structures indicates that water management was not merely a survival mechanism but an integral aspect of the region's socioeconomic and sociocultural practices, promoting stability and fostering interregional interactions.

The results also evidence the spatial configuration of Marmarica, characterized by an interconnected network of coastal and inland settlements that facilitated regional connectivity. Prominent urban centers in western Marmarica included Tobruk (*Antipyrgos*), Menelaos, or Bardia (*Petras Megas*). In eastern Marmarica, significant centers comprised Sollum (*Catabathmus Maior*), Marsa Bomba (*Ainesisphyra*), Marsa el Asi (*Azy*), Marsa Matruh (*Paraetonium*), Marsa Hawala (*Calamaeum*), Ras Abu Hashafa (*Ladamantia*), Marsa Baqqush (*Zygris*), Ras Daba (*Zephyrum*), Al Dab'a (*Caportis*), Derasiya (*Derras*), or El Alamein (*Antiphrae*). These major coastal settlements were complemented by the inland hubs of the Al-Jaghbub (Libya), Siwa, and Qara (Egypt) oases.

This structural and landscape configuration demonstrates a dynamic interrelationship between centralized economic hubs and decentralized rural production zones. Rural areas were sustained by localized water management systems and supported agricultural and resource production, while urban centers presumably facilitated trade, resource allocation, and interregional exchange. Together, these systems integrated Marmarica into the broader Mediterranean and surrounding economies.

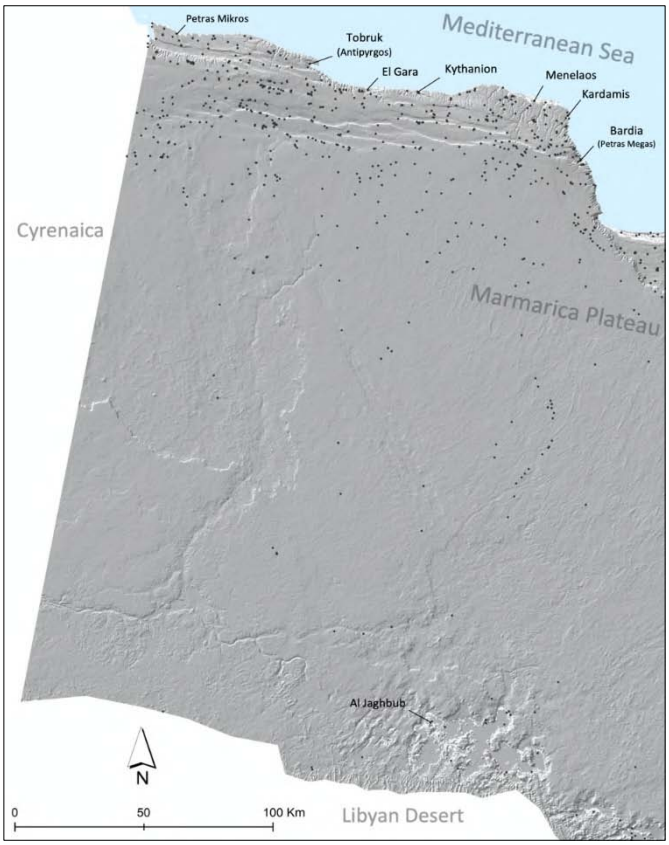


Figure 7.5. Map of western Marmarica (NE-Libya) boundaries, illustrating the locations of ancient sites referenced in the text.

Collectively, they constituted an integrated system that balanced local resource exploitation with external economic demands and facilitated regional specialization, enabling communities to produce and exchange

goods within a network that extended beyond the immediate geographical area. Therefore, the integration of diverse lines of archaeological evidence — including ancient settlements, burial sites, productive zones, resource catchment areas, and historic routes— provides a comprehensive representation of archaeological site distributions and settlement dynamics, as well as the socioecological and socioeconomic strategies developed in Marmarica from a long-term perspective.

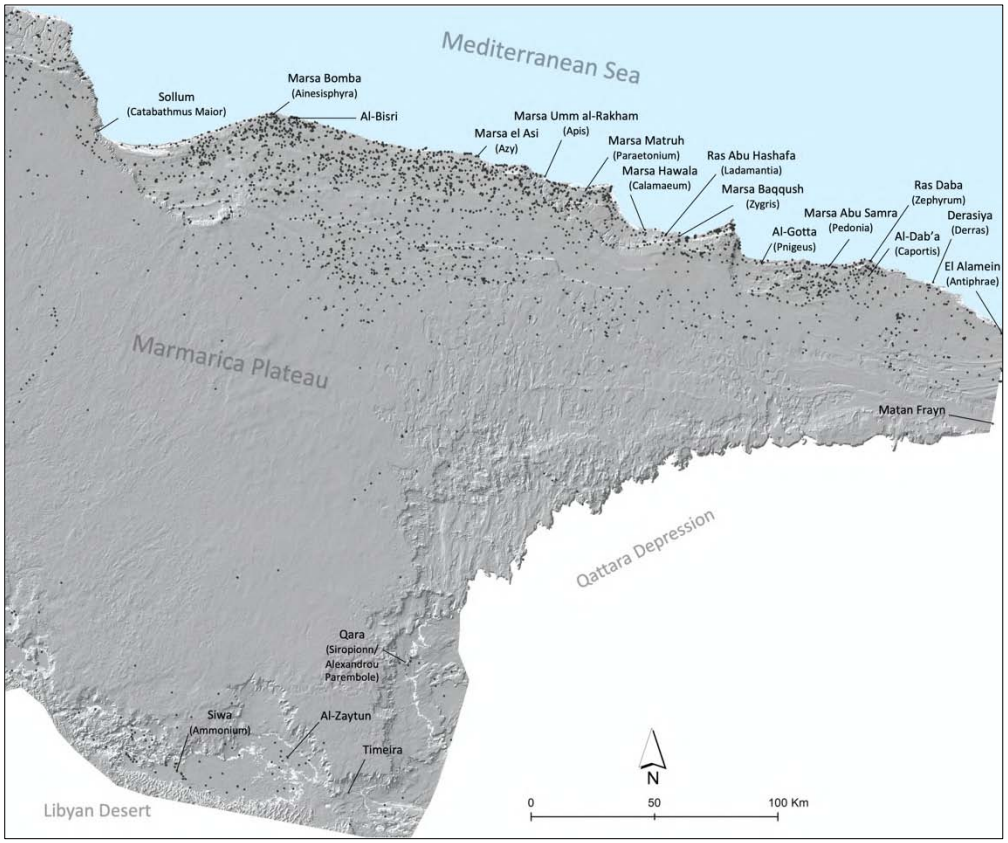


Figure 7.6. Map of eastern Marmarica (NW-Egypt) boundaries, illustrating the locations of ancient sites referenced in the text.

On a preliminary basis, the spatial distribution observed in this region provides significant insights into the organization and settlement patterns of ancient Marmarican communities. This first overview suggests variations in

settlement densities and connectivity patterns. To further explore such underlying organizational structures and their driving factors, this study implemented a series of quantitative methods, building on the methodological framework established in the previously studied case. These analyses initially included Kernel Density Estimation (KDE), Ripley's *K* function, the Hopkins–Skellam test (K-S), and percolation analysis. Collectively, these methods constitute a robust analytical framework for interpreting spatial distributions, thereby facilitating the identification of clustering and connectivity patterns across multiple scales.

The KDE identified distinct zones of high and low archaeological site densities, with northern territories exhibiting the highest concentrations, particularly around modern urban centers such as Tobruk and Bardia in northeastern Libya (western Marmarica) and Sidi Barrani, Marsa Matruh, and El Dabaa in northwestern Egypt (eastern Marmarica). These spatial patterns suggest that environmental conditions, including coastal proximity and the influence of the Mediterranean climate, likely played a pivotal role in site locations. These areas provided favorable conditions for stable settlement, including moderate climates and access to maritime resources. Conversely, although less dense, significant site clusters were observed around inland oases, notably in Siwa (Egypt) and Al-Jaghbub (Libya). The strategic importance of these locations is characterized by the presence of water resources, arable lands, and production facilities, underscoring their role as nodes of interaction within arid landscapes. These results highlight the interplay between environmental suitability and socioeconomic factors such as trade and resource accessibility in shaping settlement patterns.

The application of Ripley's *K* function confirmed a non-random distribution of sites, with the observed clustering deviating significantly from the patterns expected under Complete Spatial Randomness (CSR). Thus, the clustering tendency, substantiated by KDE and further corroborated by the Hopkins-Skellam test, finally indicated a deliberate spatial organization potentially influenced by underlying geographical, environmental, and socioeconomic factors.

The percolation analysis, for its part, provided valuable insights into the spatial connectivity of documented multi-period settlements. At smaller scales, settlements cluster locally, reflecting cohesive communities within a critical interaction distance, which aligns with the daily travel limits for people on foot (14–15 km). As the analysis expands, a broader network of interconnected clusters emerges, indicating the integration of local groups into a regional framework. These clusters highlight the inclusion of more distant settlements, reflecting an interconnected system of exchange and communication. Moreover, the hierarchical nature of these networks, with significant nodes at Marsa Matruh, El Dabaa, Al-Jaghbub, and Siwa, underscores the role of key centers in sustaining socioeconomic cohesion and resilience across the region.

In addition, this study systematically analyzed the relationship between settlement locations and variables such as accessibility to watering places, productive areas, and mobility networks –i.e., known traditional paths and FMN corridors. The analyses revealed the complex strategies employed by communities to adapt to a landscape marked by resource scarcity and environmental challenges. Central to the observed settlement distribution is

the close relationship between settlement locations and their accessibility to critical resources. The results demonstrated that settlements were strategically positioned to ensure access to water, productive areas, and mobility structures, optimizing daily interactions and meeting the subsistence needs of these communities.

A consistent pattern emerges, with settlements concentrated within low travel-cost zones around water sources, particularly cisterns and other constructed features. This distribution reflects a deliberate adaptation to the arid conditions that define the region, where water was not only a necessity but a central organizing principle of settlement life. This assumption is supported by evidence that the majority of settlements were situated within a 2-hour walking distance from water sources, a proximity statistically validated as significant. Similarly, the Kolmogorov-Smirnov (K-S) test revealed strong associations between settlement locations and water-related variables, with the highest D-values obtained for water source intensity and cost distance from water sources. These results confirm that settlement distribution was systematically organized around water access rather than being random. Additionally, the Berman test further underscores this relationship, with significantly high Z-values for water source intensity and negative Z-values for cost distance from water sources. In conjunction, these results highlighted the prioritization of proximity to water as a key subsistence strategy in an arid environment. Lastly, complementary ROC-AUC analysis underscores the explanatory power of water-related variables, with water source intensity achieving the highest predictive value among all tested variables. This high predictive power positioned water accessibility as a central factor in settlement planning in Marmarica.

While access to water resources was crucial, proximity to productive areas also played a significant role in shaping settlement distributions. Cost-distance analyses evidenced that all settlements were located within an 8-hour isochrone of productive zones, optimizing access to key resources. Similarly, the value associated with productive zone intensity exerted a notable influence on settlement patterns. Additionally, statistical tests, including the Kolmogorov-Smirnov (K-S) and Berman (Z1/Z2) tests, further confirmed the significance of productive area intensity, although the Area Under the Curve (AUC) value indicated only moderate predictive capability. Collectively, these results suggest that while productive areas were important considerations in settlement planning, their influence was more indirect compared to the primary role of water sources in determining settlement distributions.

Finally, proximity to mobility networks, including historical routes and natural corridors generated using the FMN methodology, also influenced settlement distributions. Nearly all settlements were located within a 2-hour walking distance of these routes, underscoring their importance in facilitating connectivity, resource access, and interaction between communities. Statistical analysis revealed a significant, although less pronounced, correlation between settlement locations and mobility routes. Both historical routes and FMN-generated corridors exhibited low D-values and moderately negative Z-values, indicating a tendency for settlements to cluster near these transit pathways. ROC-AUC analysis showed a lower predictive power for mobility-related variables compared to water access, similar to that of productive zones discussed above.

The results of this study revealed how ancient Marmarican communities adapted to their resource-scarce environment through careful spatial planning while simultaneously modifying and transforming the landscape. By prioritizing access to watering places, these communities ensured their immediate survival while establishing a foundation for long-term sustainable practices. Proximity to productive zones and mobility networks complemented this strategy, reflecting an integrative and balanced approach to resource management.

The settlement patterns observed illustrate how Marmarican communities navigated the challenges of an arid environment by prioritizing access to watering places while also leveraging productive zones and mobility routes. Water accessibility emerged as the cornerstone of subsistence strategies, shaping spatial organization and social dynamics, while secondary variables provided logistical and economic advantages. Moreover, the location of numerous coastal sites associated with strategic maritime routes suggests that socioeconomic and sociopolitical factors must also be considered within this narrative. Consequently, this study highlights the adaptability of ancient communities in transforming their environment to optimize resource management while emphasizing the critical role of sociocultural, socioeconomic, and sociopolitical factors in shaping these dynamics. By enhancing our understanding of Marmarica, this study contributes to broader discussions on human adaptation in harsh environments, offering valuable insights into resilience and resource management that remain relevant today.

7.3.2 Desert Networks: Relations Between Mobile and Settled Groups

The dynamics between mobile and settled groups have been extensively studied (e.g., Awad, 1954; Abou-Zeid, 1959; Khazanov, 1984; Cribb, 1991; Cole & Altorki, 1998; Barnard & Wendrich, 2008; among others). As mentioned earlier, this relationship is often problematic, as most historical sources on nomadic or semi-nomadic peoples were recorded by settled populations, frequently reflecting misconceptions that either denigrate or idealize a mobile lifestyle (Barnard & Wendrich, 2008: 10). For instance, a record from the reign of Ramesses III portrays the Libyans: "[The Libyans] schemed to plot rebellion a second time, to finish their lifetime on the frontier of Egypt. They gathered the hill-countries and plains of their district. They laid death upon themselves [by coming] against Egypt…" (Edgerton & Wilson, 1936: 91). However, by the 1st century CE, Strabo in his *Geography* challenged these stereotypes when referring to mobile populations on Egypt's frontiers: "These are nomads and neither many nor warlike, although they were believed to be so by the ancients because of their frequent raids on defenseless people" (Strabo, *Geography* 17.1.53; http://data.perseus.org/texts/urn:cts:greekLit:tlg0099.tlg001.perseus-eng2).

This dichotomy between sedentary and nomadic ways of life has deep historical roots, reflecting broader tendencies to view mobile groups as "the others" or "outsiders" (e.g., O'Connor & Quirke, 2003). Such representations often obscure the nuanced realities of nomadic or semi-nomadic societies, which are characterized by complex social organizations, intricate ethnic identities, and political structures. Reductionist categorizations fail to account for the complexity that often exists between sedentary and mobile lifestyles. For instance, nomadic groups may depend on settled communities for trade,

agricultural goods, or political alliances, whereas settled societies may rely on mobile populations for trade facilitation, resource management, or protection in peripheral zones.

The focus of movement, rather than settlement, offers a more dynamic lens through which to view these societies. Mobility in Marmarica, as in other regions, was not merely an adaptive response to environmental or political pressures, but a strategic and often opportunistic choice. Seasonal migrations, trade expeditions, and the establishment of transitory settlements demonstrate that mobility was integral to the region's socioeconomic and sociocultural systems. In many cases, it was mobile members of ostensibly settled communities —such as traders or herders— who bridged the gap between static and dynamic modes of living.

This interdependence becomes particularly evident when examining socioeconomic networks. Trade, by its nature, necessitates mobility, whether through short-distance exchanges between agricultural producers and nearby markets or long-distance trade routes that connect disparate regions. In Marmarica, evidence of ancient pathways underscores the importance of mobile groups in sustaining these networks. Their ability to navigate challenging terrains and adapt to shifting political or environmental circumstances ensured the flow of goods and cultural practices across the region.

The notion of mobility as a unifying thread rather than a binary opposition to settlement also challenges traditional narratives of "the desert and the fertile land." Peripheral zones, often seen as marginal, were instead vibrant spaces

of interaction, negotiation, and coexistence. These areas blurred the boundaries between settled and nomadic lives, fostering adaptive strategies that were as much about cultural exchange as they were about subsistence.

Consequently, reconstructing Marmarica's pathways provides an opportunity to rethink the historical framing of mobile populations. Rather than being marginalized figures or perceived threats to settled societies, mobile groups emerge as integral actors within broader sociocultural and socioeconomic systems. Thus, by examining the motivations, patterns, and impacts of mobility, we gain a more holistic understanding of the region's history and its interconnected communities. This movement-focused approach shifts the emphasis from fixed locations to dynamic networks, encouraging a re-evaluation of the binary constructs —such as nomadic *versus* sedentary— that have long shaped the study of desert peoples.

Within this framework, the application of focal mobility network (FMN) methodology, combined with network science approaches, has revealed significant patterns that align with the broader context of Marmarica's historical landscape. The generated models highlight the interplay between geomorphology and hydrology in shaping mobility networks. By incorporating slope gradients, *wadis*, and water resource availability into the accumulated cost surface (ACS) model, a nuanced understanding of Marmarica's landscape emerges. The predominance of arid conditions, coupled with the spatial distribution of *wadis* and cisterns, underscores the central role of water resources in directing past movements. These elements not only served as essential points of access but also acted as critical

determinants of connectivity, emphasizing their importance in the adaptive strategies of ancient communities navigating this harsh environment.

The FMN methodology revealed a dense network of potential mobility pathways, with notable corridors concentrated in the coastal areas and extending toward inland oases. These routes show a clear preference for natural corridors, particularly marked by *wadis* and cisterns, which played a dual role as both barriers and facilitators of movement. This duality underscores the complexity of mobility strategies, where natural features serve as both obstacles and enablers of connectivity. Notably, the coastal routes linked key settlements and harbors, such as Marsa Matruh, Sollum, Menelaus, or Antipyrgos, integrating maritime and overland trade networks. Similarly, the inland north-south connections between coastal zones and inland oases, such as Al-Jaghbub, Siwa, and Qara, highlight the strategic importance of water resources in supporting long-distance mobility.

Critically, a significant contribution of this study is the development of a high-resolution mobility model that captures the dual role of hydrographic features —previously mentioned— within desert routes. This study's use of binary classification to delineate the presence of *wadis*, combined with hydrological modeling to calculate flow accumulation, was instrumental in reconstructing Marmarica's landscape. This achievement was realized through the integration of slope data, *wadi* networks, and water management systems (primarily cisterns) into the friction surface model, effectively highlighting the complex interplay between these factors in shaping mobility patterns. Furthermore, the use of remote sensing data, a digital elevation model (DEM), and GIS-hydrological analysis tools enabled the identification of distinct

ecological niches. This approach underscores the variability of mobility constraints across different zones, including the Coastal Zone, Northern Tableland, Pre-Marmarica Plain, Marmarica Plateau, and desert margins offering deeper insights into the relationship between environmental features and historical movement dynamics.

This methodology effectively addressed the challenge of limited prior data on the region's environmental features, providing a robust framework applicable to similar studies in other arid landscapes. However, the FMN methodology in this context faced certain limitations, including the overrepresentation of potential routes in flat terrains and edge effects at the boundaries of the study area. To mitigate these issues, statistical value reclassification and flow normalization techniques were applied, refining the model's clarity and emphasizing the most significant corridors. These adaptations enhanced the reliability of the results, ensuring that the reconstructed pathways more accurately reflect the region's historical mobility networks.

The spatial patterns derived from the analysis corroborated the hypothesis that water availability and land features were critical to the organization of past movements. The northern areas emerged as focal points for mobility, benefiting from relatively favorable ecological conditions, Mediterranean connections, and dense *wadi* networks that supported water collection and agricultural practices. In contrast, the Marmarica Plateau, marked by its aridity and reliance on cisterns, exhibited more isolated but strategically significant mobility corridors. These corridors were closely associated with evidence of ancient water-harvesting structures, which played a vital role in connecting coastal settlements with inland oases.

Furthermore, the identification of key mobility corridors —such as those linking Sollum and Sidi Barrani with Al-Jaghbub, or Marsa Matruh with the Siwa and Qara oases— aligns closely with archaeological evidence of settlements and mobility networks. The convergence of routes around critical hubs, particularly Sollum Bay and Marsa Matruh, highlights the significance of these areas as nodes within broader communication networks. Additionally, the analysis underscored the importance of short-, medium-, and long-distance connections between inland oases, reinforcing their integration into the regional mobility framework.

Expanding upon these results, as previously discussed in the first case study, the application of network science approaches to the study of Marmarica's networks provided a more comprehensive understanding of how connectivity and spatial dynamics shaped socioeconomic and sociocultural structures over time. The methods employed —including the analysis of mobility routes, topological entities (nodes and edges), and the integration of network metrics— facilitated a nuanced examination of the region's spatial dynamics of mobility, connectivity, and interaction patterns. Metrics such as centrality, betweenness, and closeness quantified the strategic importance of specific routes (edges), and settlements (nodes). In addition, distinct spatial network configurations (K-NN, MDN, RNN, GG, and β-skeletons) revealed dynamic patterns of interaction and accessibility across multiple spatial and temporal scales. This discussion also critically synthesizes and revises the results obtained from these network metrics and models, emphasizing their implications for understanding the evolution of Marmarica's ancient sociospatial system.

Metrics including degree centrality, betweenness, and closeness centrality facilitated the identification of routes of strategic importance. By highlighting pathways that were not only highly connected but also crucial for mediating interactions across the network, the analysis elucidated how these routes influenced the cohesion and development of regional societies. For instance, hubs such as Tobruk, Sollum, and Marsa Matruh emerged as strategic nodes or connection points, underscoring the significance of specific areas as facilitators of social and economic exchanges. Furthermore, this comprehensive examination of the network revealed the extent to which mobility patterns shaped Marmarica's social and political structures. Routes with high centrality values likely functioned as conduits for cultural diffusion, trade, and political influence, suggesting a direct correlation between network efficiency and the resilience and adaptability of these ancient communities.

A second approach —also focused on the structural properties of the Marmarica network— complemented the initial analysis by representing the region as a system of nodes and edges. This representation enabled the visualization of relationships between key locations and their connections, providing a clearer picture of the network's internal dynamics. Through this structural analysis, the identification of highly interconnected nodes and edges provided further insights into the resilience and strategic importance of certain routes and hubs, emphasizing the importance of network design in supporting long-term connectivity and adaptability in arid landscapes.

Importantly, the degree centrality metric highlighted nodes and routes exhibiting the highest levels of direct connectivity within the network. This approach identified key settlements and corridors that served as primary

hubs of interaction, facilitating a dense web of relationships. However, as previously detailed in this work, connectivity was not solely determined by the number of direct connections. The intensity of these connections — measured by factors such as frequency of use and potential flow accumulation— played a critical role in understanding the true significance of these entities. These patterns are especially evident in northern areas along the Libyan-Egyptian coast. Similarly, routes between oases, although fewer in number, demonstrated more robust connections, yielding higher functional centrality compared to those with numerous weaker links. These results emphasize the need to integrate quantitative analyses of connection strength into qualitative assessments, offering a more comprehensive understanding of the structural and functional dynamics of mobility networks.

On the other hand, the analysis of closeness centrality highlighted nodes and routes optimally positioned for rapid and efficient access to the rest of the network. High-closeness entities emerged as strategic centers, facilitating swift communication and exchange across diverse areas. This was particularly evident in central zones, such as Sollum and Al-Jaghbub, which emerged as high-closeness centers, ensuring efficient communication between coastal and inland areas. These insights provide a deeper understanding of the spatial strategies employed in ancient Marmarica to optimize connectivity, particularly by leveraging from key hubs as facilitators of regional and interregional interactions.

Finally, betweenness centrality offered a complementary perspective by emphasizing the mediating roles of nodes and links within the network. Entities with high betweenness served as critical bridges, enabling the flow of

goods, people, and information between otherwise disconnected areas. Notably, the zones including Tobruk, Menelaus, Sollum, Sidi Barrani, or Marsa Matruh emerged as pivotal focal points, connecting northern routes between western and eastern Marmarica. These nodes and edges proved indispensable for maintaining the cohesion and functionality of the network. The strategic importance of these elements suggests that their loss or disruption would have resulted in significant network fragmentation, with far-reaching consequences for the region's broader socioeconomic systems. Furthermore, this metric was instrumental in identifying key transit corridors, particularly those following the Masrab Diqmash, Masrab al-Istabl, Masrab Khalda, and Masrab al-Dara routes. These corridors not only linked northern areas with inland oases but also likely played a crucial role in facilitating regional integration and ensuring the sustainability of interregional connections.

The integration of diverse spatial network models also facilitated a comprehensive analysis of settlement interactions. Models such as K-NN and MDN highlighted thresholds of connectivity and the broader spatial reach of settlements respectively, while RNN emphasized core interaction patterns, minimizing redundancy. GG and β-Skeleton models revealed dynamic relationships based on proximity and influence, offering nuanced insights into spatial hierarchies. Additionally, metrics such as density, fragmentation, and connected components offered a detailed view of the balance between cohesion and segmentation within these networks. The results enhanced our understanding of how ancient societies managed sociospatial interactions and structured their territories, laying the groundwork for future research on

historical mobility and network resilience across varying temporal and spatial scales.

In general terms, this study elucidates a progressive transformation in the connectivity and distribution of settlements, reflecting broader socioecological and sociohistorical trends in Marmarica. Across all periods, spatial networks revealed a dual dependence on both local interactions and broader regional connections, with these dynamics shifting and adapting over time. Moreover, the interplay between local, regional, and long-distance networks provides critical insights into the organizational structure of Marmarica, underscoring the complexity of its settlement systems and the adaptability of its communities.

The models highlight the importance of regional cohesion in sustaining relatively small settlement systems, with networks achieving a balance between local and broader connections. During the Late Bronze Age (LBA), Early Iron Age (EIA), and Archaic (ARC) periods, the networks exhibited high levels of regional cohesion, even with a relatively low number of settlements. This suggests a system in which settlements maintained active connections beyond their immediate neighbors, likely driven by the need for cooperation and resource-sharing in a sparse and challenging environment. In later periods —Classical (CLA), Hellenistic (HEL), and Roman (ROM)— the networks revealed a shift toward territorial expansion and the incorporation of more distant settlements, often at the expense of local connectivity. This evolution reflects broader regional and supra-regional dynamics. While the earlier phases relied on cooperative frameworks to ensure stability in a demanding environment, the later phases were marked by centralization and

territorial expansion. The decline in settlement density over time underscores a transition from tightly knit networks to more extensive but less cohesive systems, emphasizing changing priorities in settlement strategies, such as the increasing importance of long-distance trade routes.

It is important to note that the apparent rise of settlement hierarchies, particularly during the Classical (CLA) and Hellenistic (HEL) periods, indicates the emergence of central places or hubs (Figure 7.7). These hubs likely functioned as administrative centers, trade nodes, or focal points, diminishing the necessity for direct connectivity between smaller settlements. For instance, the decreasing density at lower values (e.g., 1-NN) suggests that smaller settlements increasingly depended on larger, more central nodes for their connections. This trend reflects the consolidation of power and resources within urban centers, aligning with broader Mediterranean patterns of centralization and urbanization during these periods. The emergence of such hierarchies highlights a significant shift in settlement strategies, emphasizing the role of central nodes in facilitating regional integration and supporting the socioeconomic dynamics of larger territorial systems.

A second notable phenomenon is territorial expansion. During the Roman period (ROM), there was a marked increase in the number of connected settlements, accompanied by a decline in network density across all scales. This pattern reflects Roman strategies of expansion and integration, which prioritized incorporating vast territories into a cohesive administrative and economic system. The dispersed network configuration indicates a focus on establishing key infrastructural connections, such as roads and trade routes, to enable administrative control and facilitate long-distance economic

exchanges. Simultaneously, the decline in network density underscores a reduced dependence on closely knit local networks, which were likely supplanted by the centralizing influence of urban centers.

The combined insights from these analytical approaches point to a highly interconnected landscapes wherein mobility and accessibility were central to social and economic organization. The identification of strategic hubs and routes suggests that these locations served as focal points for interaction, trade, and exchanges, reinforcing their role in shaping the broader social, cultural, economic, and political landscape of Marmarica. Moreover, this study demonstrates the efficacy of network approaches in unraveling the complexities of ancient interaction networks. Through the integration of quantitative techniques with spatial and structural analyses, it was possible to (re)construct a detailed picture of the dynamics that underpin Marmarica's connectivity. These results not only enhance our understanding of the region's historical evolution but also offer a methodological framework for similar studies in other comparable contexts.

Future research could investigate seasonal and temporal variations in network dynamics or integrate additional datasets, such as field archaeological and environmental evidence, to further refine our understanding of ancient mobility and interaction. This line of inquiry has the potential to shed light on the adaptive strategies employed by ancient communities in response to environmental fluctuations, social demands, and economic cycles. Such efforts would enhance the analytical potential of this approach, providing deeper insights into the interplay between human and non-human factors and their combined influence on spatial organization.

7.3.3 Reconstituting Societies in "Marginal" Spaces

The historical account of Northeast Africa has often been dominated by a "Nile Narrative", which places urban areas and riverine cultures at the center while relegating other regions to the fringes (Cooper, 2022). Such a narrative pervades environmental and socioeconomic aspects, contributing to defining Marmarica as "marginal". Paradoxically, activities that are perceived as marginal can sometimes be essential to dominant economic centers (González-Ruibal, 2021). Marmarica exemplifies such a paradox: despite its strategic position within broader trade circuits, this region has been overlooked in the framework of a narrative relying on textual and iconographic sources produced by neighboring groups (Nielsen, 2017; Rieger, 2019).

To add further emphasis to this picture, the societies that inhabited Marmarica, referred to as Libyans —*Tjemehu*/*Tjehenu*; *Libues aegyptii* or *Marmaridae* (Herodotus, *Historiai* 3,13; Ptolemaios, *Geographike Hyphegesis* 4,5,2-4; Plinius, *Naturalis historia* 5,6)— in textual sources, were traditionally defined as nomadic communities (Bates, 1914; Conwell, 1987; O'Connor, 1983, 1990; Strassler, 2009; Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Snape, 2013; Nielsen, 2017; Hulin, 2020). This characterization has contributed to the perception of Marmarica as marginal, as itinerant groups have historically been relegated to a secondary, peripheral position in traditional narratives (González-Ruibal, 2021). However, as stated before, research on nomadism has highlighted the issues of considering these societies in a straight dichotomy with settled communities (Carvajal, 2021). It is crucial to recognize the importance and value of studying these "marginal" habitats, spaces, and socioeconomic practices, particularly when some approaches have proven to be overly

simplistic and static (Rieger, 2019: 5). In the case of the Marmarican groups, this study underlines the idea that these communities must be considered not at the fringes but at the core of nomad-settled dynamics, specifically regarding mobility. Indeed, previous studies have hinted at interactions between nomadic and sedentary populations in Marmarica (e.g., Nielsen, 2017; Rieger, 2019, 2023). This approach underpins a historical perspective by considering this region in its own right while proposing a model for understanding the dynamics of these societies within the broader circuits of the Mediterranean and North Africa.

The methodologies employed in this study have demonstrated the interconnectedness of Marmarica with its neighboring regions. This approach reinforces the idea that this region was not an isolated, marginal space but an active place participant in broader networks of trade, mobility, and sociocultural exchanges. Reframing Marmarica in this way opens avenues for reconsidering other so-called "marginal" places and practices, emphasizing their centrality in shaping ancient regional histories (Rieger, 2019). Ultimately, this discussion also highlights the importance of re-evaluating the frameworks through which understand ancient interactions are understood. The Marmarican communities offer a compelling case for moving beyond reductive narratives, advocating for a more inclusive and dynamic approach to ancient socioecological systems. This shift not only enriches the understanding of Marmarica history but also contributes to broader efforts to decenter dominant narratives by unifying the Mediterranean and North Africa under the same research framework.

During the Late Bronze Age / New Kingdom, despite Egypt's extensive expansionist motivations —particularly during the mid-18th Dynasty, which fostered a complex network of relationships across the Near East and Eastern Mediterranean— the Libyan regions west of the Nile Valley (Marmarica / Cyrenaica) were traditionally presented peripherally in the political and economic sphere (Snape, 2003). While other foreign groups —Nubians, Levants, or Aegeans— are frequently depicted in Egyptian records as bearers of tributes and trade goods, Libyans appear in a more tokenistic fashion. This marginalization is reflected in the portrayal of Libyans as "traditional enemies" rather than active participants within Egypt's broader sphere of influence, highlighting a pattern of cultural stereotyping and exclusion (Wachsmann, 1987; Kitchen, 1990; Leahy, 1990; Snape, 2003; Vivas-Sainz, 2013; Moreno-García, 2014; Brooke Anthony, 2017; Shaw, 2023).

From an archaeological perspective, the study of Marmarican (Libyan) communities prior to the Graeco-Roman period faces significant challenges, primarily due to insufficient archaeological field data. Although numerous archaeologists have conducted fieldwork in the region (Snape, 1998; Hounsell, 2002; Simpson, 2002; Hulin, 2008; Hulin *et al.,* 2009, 2010; Vetter, Rieger *&* Nicolay, 2009, 2014; Vetter, Rieger *&* Möller, 2013; Vetter *&* Rieger, 2019; Rieger, 2017, 2019, 2023; among others), the vastness of the area, its harsh climate, and contemporary political instability —particularly as the region lies along the modern Libyan–Egyptian border— have hindered the comprehensive collection of field data. Additionally, the non-sedentary lifestyle of Marmarican communities poses further challenges to archaeological research, as it leaves a less substantial material footprint compared to sedentary societies. Together, these factors have significantly

hampered efforts to fully understand Marmarica's socioecological and historical trajectories.

Nevertheless, archaeological evidence from coastal areas, including excavations at Zawiyet Umm el-Rakham, Bate's Island, OSL-dated sediment fills, and surveys in the Marsa Matruh area, have identified remnants of the late second millennium BCE Libyan occupation (Rieger, 2019, 2023). However, the material culture —characterized by rudimentary ceramics, lithics, and dry-stone architecture of the Capsian tradition— offers little specificity in defining a distinctive Libyan cultural horizon (Hounsell, 2002; Simpson, 2002; Snape, 2003). Similarly, the oases of the Western Desert, which served as critical nodes for trade and communication, provided limited material evidence of Libyan presence. While written sources suggest Libyan activity in these oases, archaeological research has yet to uncover substantial remains unequivocally attributable to Libyan groups during this period. Although existing evidence indicates prehistoric occupation, most evidence situates these oases within trade circuits starting from the 7th century BCE, further complicating the identification of earlier Libyan traceability (Hulin, 2001; 2011; Snape, 2003; 2013).

Given these limitations, the archaeological study of the western Ramesside fortress at Zawiyet Umm el-Rakham has significantly altered our understanding of ancient Marmarica's historical trajectory (Habachi, 1980; White, 1986; Conwell, 1987; Snape, 1998; Simpson, 2002; Snape *&* Wilson, 2007; Nielsen, 2016; Gasperini, 2017). Evidence from this site underscores the extent of Ramesside involvement in the region during the Late Bronze Age (New Kingdom), while also highlighting the relatively brief duration of this

engagement. As noted by Nicky Nielsen (2017), the presence of Egyptian material culture and evidence of Late Bronze Age water-harvesting structures south of the fortress reveals that Egyptian occupants of Zawiyet Umm el-Rakham actively utilized fertile hinterlands for agricultural purposes. This adaptation underscores the Egyptians' pragmatic approach to frontier management, as they incorporated localized irrigation systems in contrast to the inundation-based farming methods of the Nile Valley, raising important questions about knowledge transfer. Egyptians' reliance on local expertise, likely provided by Libyan communities familiar with the region's unique hydrological conditions, reflects a significant level of interdependence. Further support for this hypothesis comes from the biography of Neb-Re, the fortress commander, which references the involvement of Libyans in agricultural activities "He made [the Libyans] masters/possessors of settlements so that they would plant trees; so that they would work many vineyards and […] in the countryside (Nielsen, 2017: 1566). This evidence aligns with broader interpretations of Egyptian frontier policies, which sought not only to exert military and political control but also to foster cooperative relationships with local populations.

Consequently, the previously distinct worlds of sedentary and nomadic populations underwent significant changes (at least) after 1400 BCE. The advent of the Eastern Mediterranean trade circuit, which flourished by the 14th century BCE, likely served as a transformative force in the region. Both Zawiyet Umm el-Rakham and Bates' Island provide evidence of this broader connectivity with the presence of Cypriot, Aegean, and Levantine pottery alongside Egyptian ceramics. This highlights the role of these sites — particularly Bates' Island— as nodes within the Eastern Mediterranean trade

networks. The evidence supports the hypothesis that Bates' Island functioned as a revictualing station for maritime trade and was strategically positioned along the northeast African coast. Additionally, the presence of bronze-working, also suggests that the site operated as a specialized outpost facilitating exchanges of goods, technology, and even cultural practices, suggesting the presence of traders and metallurgical activities that would have redefined local economies (Habachi, 1980; Conwell, 1987; White *&* White, 1996; Snape, 1998, 2003, 2013; White, 1999; 2002; Hulin *&* White, 2002; Simpson, 2002; Snape *&* Wilson, 2007; Snape *&* Godenho, 2013; among others).

The presence of Libyan imports at this site, such as cattle products and ostrich eggs, provides further evidence of economic interaction, indicating a link between the island's foreign occupants and the mainland Libyans. Moreover, written sources describe the employment of Libyan mercenaries in the Egyptian military or as labor for construction projects during this period, further illustrating the dynamics of skilled labor migration (Conwell, 1987; Snape, 2003, 2013). However, the lack of reciprocal evidence from the Libyan side complicates the reconstruction of these interactions, leaving open questions about the nature and scale of exchange between these regions.

Following this argument, the establishment of trading harbors, whether permanent or seasonal, could have triggered substantial socioeconomic realignment among Marmarican communities. The influx of new agents introduced economic transformation likely prompted shifts in local social and political organizations, with some groups asserting control over strategic locations or resources, while others adopted more mobile or peripheral positions. This dynamic may have fueled competition and conflict, as

illustrated by the mid-14th century BCE Amarna letters, which depict Libyans clashing with eastern Mediterranean powers, including the Egyptians and Aegeans (Snape, 2003; Shaw, 2017).

The emergence of new Libyan groups such as *Meshwesh* and *Libu*, reflects a changing Libyan landscape. In fact, the construction of the previously mentioned fortress at Zawiyet Umm el-Rakham embodies Egypt's strategic response to these developments. This defensive structure suggests a concerted effort to repel Libyan migrations and to regulate exchanges along the Maryut coast, which were potentially perceived as both a military and demographic threat. However, external pressures —including climate shifts, migratory movements of Libyan groups, the disruptions caused by the Sea Peoples, and the collapse of the Late Bronze Age international network— ultimately destabilized this model. The abandonment of Zawiyet Umm el-Rakham around 1208 BCE, during the early reign of Merenptah, reflects not only the immediate challenges of maintaining Egyptian influence in the region but also the larger geopolitical and environmental shifts that disrupted established power dynamics during this period. Finally, although Egyptian sources from the 19th and 20th Dynasties emphasized their success in halting Libyan incursions, the subsequent 21st Dynasty marked a dramatic reversal (Snape, 2003; Shaw, 2017).

By this time (EIA, ARC / Third Intermediate Period), Libyans had not only penetrated Egyptian borders but also integrated into its political and cultural systems, ultimately transforming Egypt itself. This dynamic integration led to a system blending Libyan traditions with Egyptian frameworks. Far from being mere invaders or peripheral actors, Libyans became pivotal figures in

Egypt's political and cultural evolution, leaving lasting imprints on cultural and material practices as well as administrative and political systems. This period highlights not only the permeability of borders and identities in the ancient world but also the transformative potential of cultural exchange, where the interplay between political power and cultural interactions redefined both societies during this critical period (O'Connor, 1983; Bennet, 2019).

During the subsequent periods (CLA, HEL / Late Period, and Ptolemaic Period) approximately the 7th century BCE to the 4th century BCE, the inhabitants of the Marmarica region progressively expanded and intensified land use, while altering patterns of economic exploitation. This shift is evidenced by a higher density of archaeological remains, particularly from the 5th century BCE onward, when the transfer of goods between oases and coastal settlements became more traceable. One of the most compelling examples illustrating the significance of these ancient routes and locations is provided by a well-documented historical account notable for the prominence of the individual involved: Alexander the Great. During his expedition to the Oracle of Amun at Siwa (332 BCE), Alexander traversed the route from Paraitonium (modern-day Marsa Matruh) to Siwa, following the Masrab el Istabl or Masrab Khalda route. The greek author Arrian of Nicomedia describes the events in sections 3.3-4 of his *Anabasis:* "The journey along the coast as far as Paraetonium was through deserted, though not waterless, country, for a distance of 280 kilometers [...]. From there he turned inland, where the oracle of Ammon was to be found. The road is deserted, sandy for the most part and without water". Alexander's journey not only underscored Siwa's socioeconomic importance but also highlighted its role as

a sociocultural pilgrimage place during this period (Bagnall, 2006; Vetter, Rieger & Möller, 2013; Snape, 2013; Nielsen, 2017).

From the 1st century BCE to the 4th century CE (Roman period), the archaeological evidence indicates a significant increase in settlement locations and the development of advanced water and soil harvesting systems, reflecting a sophisticated adaptation to arid landscapes. These systems have enabled the cultivation of barley and grapes as primary crops, with the latter playing a pivotal role in supporting a surplus economy. The prominence of grapes points to a focus on viticulture that is potentially intended for both local consumption and trade, while legumes and tree fruits such as figs were also cultivated. This is evidenced by extensive pottery production, likely used for storage and transport, and the construction of stone structures, which appear to have been used for agricultural purposes (Vetter, Rieger & Möller, 2013; Rieger, 2023; Bagnall, 2021).

The intensification of land use and economic exploitation reached its peak from the 1st to 2nd century CE, when the continuity and volume of trade suggest the presence of well-maintained infrastructure and reliable transportation networks. The expansion and increased utilization of route systems, particularly those connecting Siwa with the Mediterranean coast, facilitated the movement of goods such as dates, olive oil, and salt, reflecting a high and sustained demand. Paraitonium emerged as a pivotal *emporium*, serving as a nexus for goods from the oasis and beyond. Other coastal hubs, such as Katabathmos Megas, or Antipyrgos, also played significant roles in supporting commerce, highlighting the region's integration into Mediterranean and desert economies. These networks supported consistent

exchanges between the oases of Siwa, Qara, and Al-Jaghbub —key trade hubs in the Libyan Desert—and the coastal, Nile Valley, and Cyrenaica markets, emphasizing the region's vital role in sustaining socioeconomic connectivity.

In general terms, although nominally under Ptolemaic control from the 3rd century BCE and later incorporated into the Roman Empire as part of the Crete and Cyrenaica province in the 1st century CE, Marmarica retained a notable degree of autonomy throughout much of its history. Positioned at the crossroads of the Libyan Desert, the Mediterranean, Nile Valley, and Cyrenaica, the region's strategic location conferred upon it a distinct identity. Consequently, its "marginal" status within the historical narratives does not align with its true importance (Chevrollier, 2016).

Critically, the purpose of this study was to explore from a *longue-durée* perspective the significant role of Marmarica as a pivotal hub in shaping socioecological and historical processes, settlement strategies, and interaction patterns within the North African and Eastern Mediterranean circuits. At first sight, the results suggest a rich picture of complex dynamics taking place in Marmarica. Such complexity can be explained considering its role as a vital crossroad linking the Aegean area, Cyrenaica, the Nile Valley, and the hinterland oasis. This stands in stark contrast to the traditional "Nile narrative", which often portrays this region either as peripheral to dominant economies or lacking broader significance. While acknowledging the value of cross-cultural research, this study emphasizes the importance of examining Marmarica on its own right. An emic approach becomes even more necessary to fully comprehend the human-environment trajectories that shaped the spatial organization of this region.

7.4 THE ANCIENT LIBYAN SEA - NETWORKS OF INTERACTION

The study of ancient interactions between the Aegean area (Crete) and northeastern Mediterranean Africa (Marmarica) along the ancient Libyan Sea has long been a subject of scholarly interest, particularly in the context of ancient maritime contacts (Cline, 1994; Broodbank, 2013; Tartaron, 2013; Knapp *&* Demesticha, 2017; Knapp, 2018; among others). A central question in this narrative is the identification of plausible sea routes and focal points that functioned as hubs for receiving and redistributing goods, facilitating trade and cultural exchanges. Several scholars, including Wachsmann (1987), Stucchi (1991), and Watrous (1992), have proposed the existence of maritime connections linking Crete to the northeastern African coast, advocating for a "southern route" that would potentially connect the coastal site at Kommos (southern Crete) to Marsa Matruh (Bates' Island) —or vice versa—. This hypothesis, supported by textual evidence, suggests a path that may have traversed the southern edge of Crete and continued eastward along the Libyan-Egyptian coast, potentially reaching areas such as the Gulf of Bomba, Bay of Sollum, and Marsa Matruh. This assumption aligns with documented Aegean seafaring traditions, which extensively engaged with regions across the Mediterranean, including Cyprus, Levant, Egypt, and beyond (Tartaron, 2013; Knapp, 2018).

From an archaeological perspective, the significance of this potential route is primarily substantiated by material evidence from Kommos (Watrous, 1985, 1992; Johnston, 2005; Phillips, 2008; Day *et al.,* 2011; among others) in Crete, and Bates' Island (Bates, 1923; Conwell, 1987; Hulin *&* White, 2002; Snape, 2013; among others) in Egypt, both of which reveal strong maritime

connections. Additionally, both coastal sites provide evidence of contacts with the broader Eastern Mediterranean through imported pottery from the Aegean, Egypt, Cyprus, and Levant, including Stirrup jars, Canaanite amphoras, Egyptian jars, and more (Snape, 2003; Knapp & Demesticha, 2017). The convergence of material culture at these sites strongly supports the hypothesis that well-established maritime connections existed, facilitating trade and cultural exchanges between these regions as well as within the broader circuits.

The feasibility of sea routes connecting Crete to the Libyan-Egyptian coast and their integration into broader maritime patterns remains critical for understanding the extent of ancient seafaring. An assessment by Gal, Saaroni, and Cvikel (2022) of ancient sailing mobility, the availability of routes, seasonal conditions, and trade-offs between coastal navigation (cabotage) and direct point-to-point passages, strongly suggests that a network of maritime routes between these regions was not only feasible but also highly demonstrable. Similarly, Gheorghiade & Spencer (2024) employed GIS-based cost-surface models to evaluate Late Bronze Age maritime mobility, emphasizing the practicality of voyages between Kommos and Marsa Matruh —and vice versa— (Tables 7.1 and 7.2). Additionally, a recent study by Daems and Danai (2025) provided further insights into maritime connectivity in the Eastern Mediterranean during the Hellenistic and Roman periods (see Gal, Saaroni, & Cvikel, 2021a, 2021b, 2022; Gheorghiade & Spencer, 2024; Daems & Danai, 2025).

The geography of the region also played a crucial role in the development of these connections. The relatively short distances between Crete and

Marmarica, combined with favorable prevailing winds (Etesian and Sirocco) and currents, made these maritime pathways both practical and efficient for ancient seafarers (Tartaron, 2013; Knapp, 2018). The Etesian winds, blowing northerly across the Aegean Sea during the summer months, facilitated travel from Crete to North Africa. Conversely, the Sirocco winds, originating in the Sahara and blowing northward toward the Mediterranean, supported return voyages. These predictable seasonal wind patterns provided ancient mariners with the directional reliability essential for maintaining regular connections. As a result, the possibility of a traversing route between Crete and Marmarica, in either a clockwise or counterclockwise direction, has been well established (Gal, Saaroni, & Cvikel, 2022; Gheorghiade & Spencer, 2024).

Table 7.1. Travel costs, measured in days of sailing (based on a maximum speed of 6 knots), between Kommos and Marsa Matruh (modified from Gheorghiade & Spencer, 2024: 47).

Harbour	Itinerary (6 Knots) (Max. Speed)	Season	
		Summer (Travel days)	Winter (Travel days)
Kommos	From Kommos	N/A	N/A
	From Marsa Matrouh	2.32	8.99
Marsa Matrouh	From Marsa Matrouh	N/A	N/A
	From Kommos	7.19	3.67

Table 7.2. Travel costs, measured in days of sailing (based on a mean speed of 3 knots), between Kommos and Marsa Matruh (modified from Gheorghiade & Spencer, 2024: 47).

Harbour	Itinerary (3 Knots) (Mean. Speed)	Season	
		Summer (Travel days)	Winter (Travel days)
Kommos	From Kommos	N/A	N/A
	From Marsa Matrouh	4.48	15.75
Marsa Matrouh	From Marsa Matrouh	N/A	N/A
	From Kommos	13.93	6.42

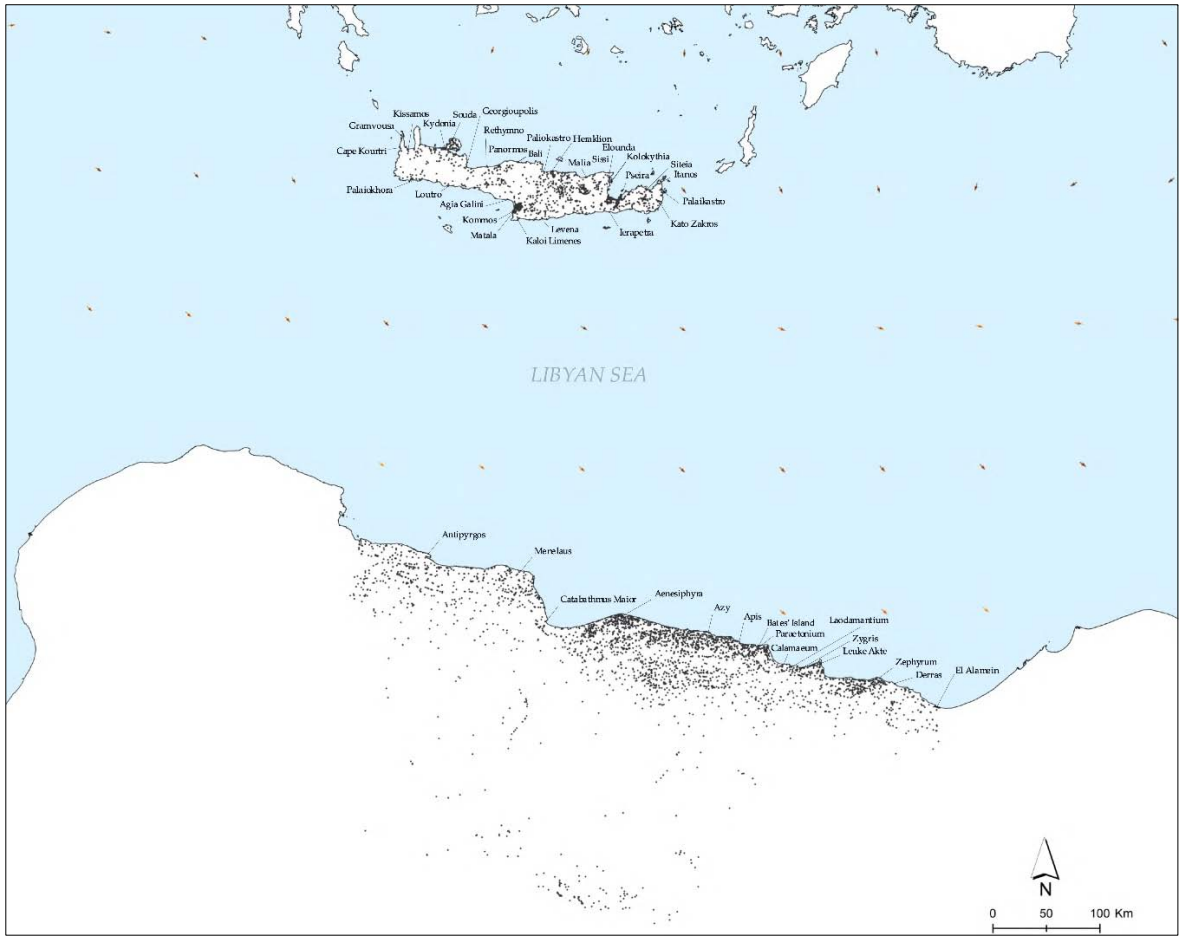


Figure 7.7. Map of the Libyan Sea illustrating the locations of the main ancient harbours of Crete and Marmarica.

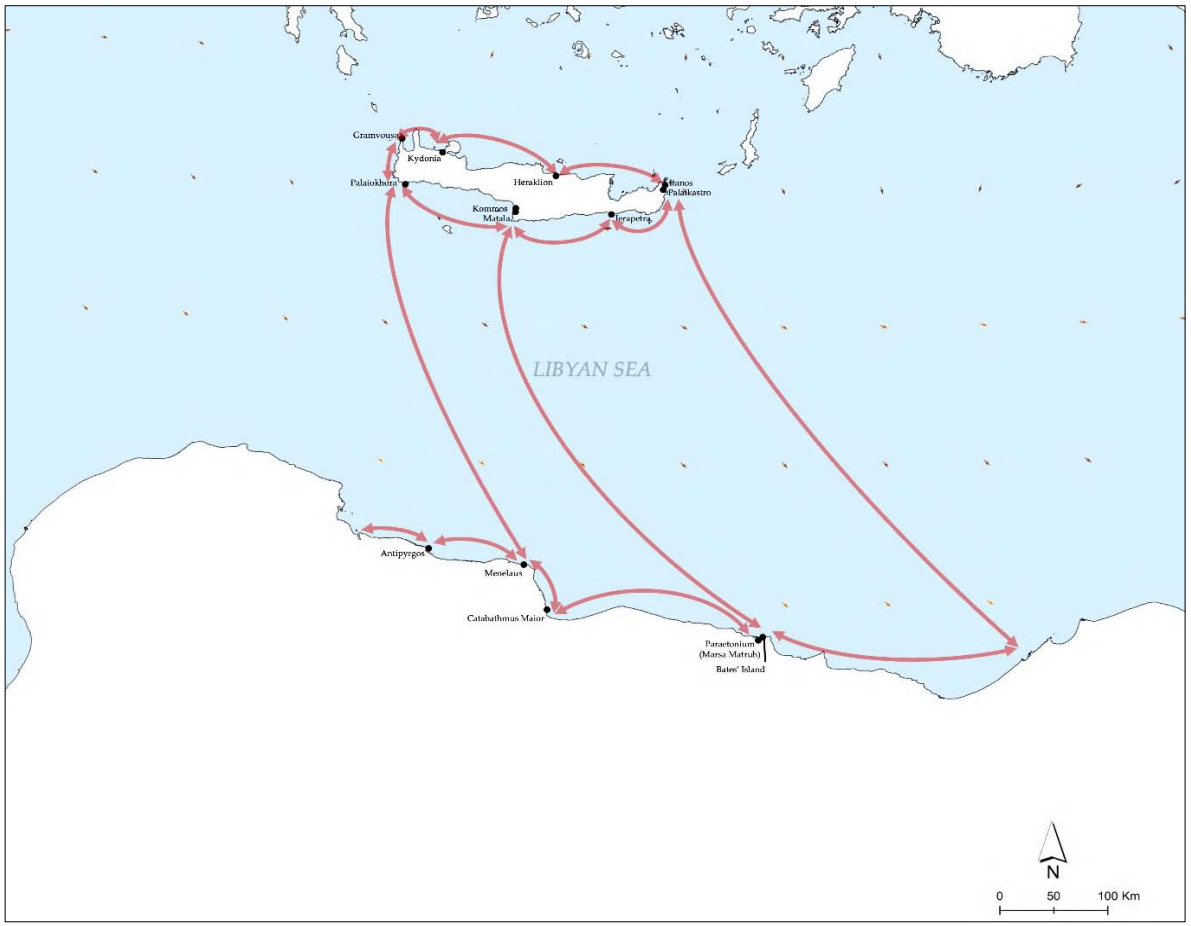


Figure 7.8. Map of the Libyan Sea illustrating the main maritime routes, including coastal navigation (cabotage) and direct point-to-point passages between Crete and Marmarica (modified from Gal, Saaroni & Cvikel, 2022).

In addition, this primary route could have been interconnected with others, extending from Crete (e.g., Matala, Ierapetra (*Ierapytna*), Kato Zakros, Palaikastro, Itanos, Heraklion, Kydonia, etc.) and Marmarica (e.g., Antipyrgos, Menelaus, Catabathmus Maior, Paraitonium, etc.) (see Figures 7.7 and 7.8), as well as eastward to Cyrenaica, Sicily, and the Italian Peninsula, and westward to Cyprus, the Levant, and Egypt, facilitating either coastal navigation (cabotage) or direct point-to-point passages over time (Gal, Saaroni, & Cvikel, 2022). The role of these coastal sites in such circuits was undoubtedly strategic, serving as hubs for the exchange of trade goods — including metals, textiles, and pottery— across short-, medium-, and long-distance networks, while also acting as conduits for the diffusion of social, cultural, economic, political, and technological practices (Sherrat, 2016). Importantly, Marmarica, with its strategic position, likely functioned as a crucial intermediary or destination for goods at the crossroads between the Trans-Saharan network system and the Mediterranean circuits, connecting both the Mediterranean and desert worlds.

At a complementary level, this study also explicitly represented the sociospatial relationships and dynamics of interaction between these settlements. For this purpose, spatial network models were employed to explore hypothetical interactions between settlements (nodes) and analyze the configuration and structure of their relationships (edges) across varying spatial and temporal scales. This approach addressed critical questions, including: What patterns emerge within the observed networks? How do these patterns align with those documented through alternative methodologies? What structural characteristics does the system reveal? By integrating these models, the study focused on coastal communities along the

Libyan Sea, aiming to uncover how spatial and temporal scales intersected to shape ancient maritime networks. Ultimately, this research contributes to the growing body of scholarship that seeks to understand the interplay between geographic space and historical processes, offering insights into the organizational structures and dynamics underpinning ancient trade and communication networks.

Building on the guiding research questions, the spatial network models validated several initial hypotheses and provided nuanced insights into the role of intermediary hubs within the context of the Libyan Sea. Coastal settlements such as Kommos, Matala, Ierapetra (*Ierapytna*), Palaikastro, Heraklion, Kydonia, Palaiokhora, or Loutro (*Phoenix*) in Crete, as well as Antipyrgos, Menelaus, Catabathmus Maior, or Paraitonium in Marmarica, were strategically positioned along maritime routes and appear to have functioned as key nodes of convergence and redistribution. These coastal sites likely served as critical points of interaction, facilitating trade, communication, and cultural exchanges between local and foreign actors. Moreover, the spatial distribution of these hubs highlights patterns of connectivity that were not necessarily linear or uniform but instead formed dynamic, overlapping networks shaped by changing circumstances.

The discernible variations in connection patterns underscore the complexity and adaptability of these interaction systems in responding to both internal and external demands over time. For instance, during the Late Bronze Age (LBA), evidence points to a particularly strong connection between Kommos and the Marsa Matruh area. This localized interaction zone was likely supported by maritime connectivity facilitated by favorable winds and

currents, enabling sustained trade and cultural exchanges. In contrast, this primary connection appears to have been temporarily disrupted in the subsequent period. However, the network's capacity to reconfigure and maintain connectivity between the two regions demonstrates its inherent resilience. This reconfiguration reflects a broader spatial distribution of interactions, highlighting the adaptability of sociospatial networks to changing geopolitical, environmental, or economic circumstances.

A second significant phenomenon is the progressive expansion of interaction networks, extending beyond the Mediterranean context to incorporate inland zones, such as desert hub oases, into broader trade circuits. This expansion ultimately links the Trans-Saharan system with the Eastern Mediterranean trade circuits, creating a highly interconnected and adaptative framework. This system underscores the capacity of these networks to bridge diverse geographical and cultural regions, facilitating sustained interaction and exchange across extensive and varied landscapes.

A comparative analysis with established approaches, such as spatial analysis, revealed a significant overlap in the observed patterns, thereby validating the hypothesized models. Notably, these results also provide additional insights, particularly in identifying nodes (settlements) that functioned as key hubs, facilitating interactions not only locally but also across broader regional scales. The emergence, persistence, or decline of these hubs over different periods offers a critical perspective on the dynamic shifts within the ancient Libyan Sea interaction sphere.

By juxtaposing hypothesized network models against those derived from empirical data, this study uncovers several key insights into the structural dynamics of the system. Specifically, the results underscore the significance of geographical proximity and accessibility as foundational factors in facilitating interactions between Crete and Marmarica. The Libyan Sea, as a natural corridor, provided an effective channel for the exchange of goods, people, and ideas. However, proximity alone does not fully explain the complexity of these interactions. While hypothetical models often assume direct connectivity based solely on geographical closeness, the observed networks suggest that additional factors —such as topography, ocean currents, and wind patterns— play a significant role in shaping these connections. Moreover, broader sociopolitical structures and socioeconomic strategies exert considerable influence, adding layers of complexity to the system. This complexity becomes particularly notable in the Archaic (ARC), Classical (CLA), and Hellenistic (HEL) periods, where the observed networks exhibit higher levels of centralization, potentially reflecting the influence of large, organized political entities. This progression reflects broader shifts in political, economic, and sociocultural landscapes, offering a framework for understanding Mediterranean connectivity on a larger scale, and requires further investigation.

Furthermore, this study employed a multi-scalar approach, analyzing phenomena across various levels or scales, including micro to macro, individual to societal, and local to global networks. These distinctions are essential for abstracting and systematically examining the key components of complex interactions, offering a nuanced understanding of the dynamics shaping interconnected systems. This approach builds upon the analytical

framework proposed by Carl Knappett (2011) in *Archaeology of Interaction: Network Perspectives on Material Culture & Society*, which identifies distinct patterns of connectivity across micro-, meso-, and macro-scales. It emphasizes the dynamic evolution of these interactions, offering a comprehensive exploration of how multi-scalar networks influenced the development of ancient societies over time.

7.4.1 Micro – networks: Proximate Interactions

The micro-scale is characterized by local interactions, involving everyday, face-to-face exchanges between individuals and groups in proximate settlements. These interactions typically occur within the limits of daily travel, with the highest frequency observed among members of the same settlement or those in immediately adjacent communities. Such exchanges form relational infrastructures through which individuals and groups negotiate shared norms and develop mutual dependencies within specific spatial contexts. Within this framework, places emerge as a relational construct, shaped by the frequency, intensity, and temporality of interactions that create interwoven social and spatial networks, where key actors mediate relationships, redistribute resources, and influence the network's structure.

The analysis of micro-networks highlights the localized nature of interactions between settlements, primarily driven by geographic proximity. These small-scale networks were vital for the resilience of communities, particularly during periods of sociopolitical and cultural shifts. For instance, during the transition from the Late Bronze Age (LBA) to the Early Iron Age (EIA), networks likely centered around shared subsistence practices, small-scale

trade, and cooperative activities, fostering stability amid change. Archaeological evidence, including co-presence in pottery styles, architectural structures, and socioeconomic practices, further supports the intensity of these local interactions. Indeed, the persistence of such networks across all periods indicates that these interactions were foundational to sustaining subsistence and social cohesion.

Furthermore, the observed clusters of nodes at this scale suggest the presence of hierarchical systems, with larger settlements functioning as focal points for surrounding communities (e.g., Knossos, Phaistos, Gortyna, etc.). These settlements likely played key roles in redistributing resources, facilitating governance, and serving as cultural hubs, reinforcing their centrality within localized clusters. Their strategic positioning enabled them to mediate relationships and concentrate resources, shaping the structure and dynamics of the broader networks. Although primarily localized, these networks were not isolated; instead, their interactions formed the building blocks of larger regional and interregional systems, suggesting a fractal-like relationship between local and broader-scale dynamics.

7.4.2 Meso – networks: Communities of Practice

The meso-scale represents habitual and moderately frequent interactions between communities situated at intermediate distances. These interactions, influenced by regional topography and evidenced through shared practices, form networks that connect settlements within a cohesive geographical region. At this scale, travel distances extend beyond the local ranges, allowing for more complex economic, political, and cultural exchanges. While still operating within regional frameworks, these interactions facilitated the flow

of goods, knowledge, and practices, fostering a balance between localized autonomy and broader integration.

Regional connectivity at the meso-scale reflects the formation of "communities of practice"—i.e., networks where shared traits link clusters of settlements (Knappett, 2011: 98-99). These communities are relationally constituted through the habitual interactions of individuals and groups, as evidenced by shared material culture and practices underscoring the existence and resilience of these interlinked settlements over time. For instance, the observed expansion in network density during the Archaic (ARC), Classical (CLA), and Hellenistic (HEL) periods was likely driven by increasing regional integration. This integration was supported by technological advancements, infrastructural improvements, and the stability of sociopolitical systems, all of which facilitated more regular and expansive interactions.

Strategic coastal hubs, such as Kommos, Matala, Lebena, Ierapytna, Kydonia, Heraklion, Mochlos, Siteia, Itanos, or Palaikastro (Crete); and Antipyrgos, Menelaus, Sollum, or Marsa Matruh (Marmarica), played pivotal roles in bridging coastal settlements and inland nodes, serving as redistribution centers for goods and points of convergence for regional interactions. Beyond their economic significance, these hubs fostered the dissemination of social and cultural practices, promoting shared traditions and regional cohesion. Their strategic placement, often at the intersection of maritime and overland routes, highlights their importance in maintaining the flow of resources and cultural exchanges across diverse communities.

Rather than being static, these networks illustrate the relational production of connections between scales. Here, the meso-level is not a fixed intermediary between the local and the global, but a dynamic and emergent layer shaped by the interactions it encompasses. Ultimately, meso-networks demonstrate their capacity to balance diversity and cohesion within regions, adapting to shifting conditions and fostering resilience. They facilitate the development of complex, flexible systems that underpin regional integration and the dissemination of shared sociocultural and socioeconomic practices.

7.4.3 Macro – networks: Interregional Interactions

At the macro scale, the Libyan Sea emerges as a dynamic corridor of intercultural and social maritime interactions, linking the broader Crete-Marmarica region and extending to larger Mediterranean and North African connections. These macro-networks serve as the backbone of interregional exchanges, supporting long-distance commercial, political, and cultural relations that integrate local and regional systems into expansive, interconnected circuits.

During the Late Bronze Age (LBA), maritime routes facilitated extensive interregional trade, with significant hubs such as Kommos and Marsa Matruh linking southern Crete to the Marmarican coast. These nodes functioned as pivotal centers within larger, coherent, and strategically organized networks. Archaeological evidence, including the presence of Cretan pottery and Egyptian-style artifacts across these regions (Pendlebury, 1930; Phillips, 2008; Simpson, 2002; Snape, 2013), underscores the tangible dimensions of these exchanges.

The temporary disruption of certain connections during the transition to the Early Iron Age (EIA) —possibly due to sociopolitical instability or environmental challenges— reveals the vulnerability of macro-networks to broader systemic stressors. However, their reactivation during the Archaic (ARC), Classical (CLA), and Hellenistic (HEL) periods simultaneously highlights the adaptability and resilience of these systems. By the Roman period (ROM), these macro-networks reached peak complexity, characterized by an unprecedented integration of nodes (settlements) and edges (connections). This expansion likely reflects the influence of Roman administrative infrastructures, which improved maritime trade, logistical efficiency, and enhanced communication across the Mediterranean and North Africa.

From a sociocultural perspective, the interactions between Crete and Marmarica exemplify broader patterns of Mediterranean connectivity. The movement of goods —such as pottery, metals, textiles, and other commodities—, was accompanied by the exchange of intangible elements. The former is evidenced in artifacts or ecofacts, such as Cretan pottery or Egyptian-style artifacts found in Marmarica and Crete. The latter, implying the movement of people —traders, workers, or artisans—, likely facilitated the transfer of knowledge and sociocultural practices. These dynamic exchanges likely contributed to the formation and evolution of cultural identities along the Libyan Sea's coastal regions, emphasizing the Mediterranean's role as a place of continuous interaction, adaptation, and transformation.

The persistence of critical maritime corridors highlights the strategic significance of the Libyan Sea as a vital conduit for broader Mediterranean connections and exchanges. Notably, the identified hubs played a crucial intermediary role in the Phoenician maritime networks, facilitating links between the Levant and western colonies. Therefore, despite substantial transitions in sociopolitical and socioeconomic systems, fundamental patterns of interaction persisted, albeit in evolving forms (Killebrew, 2019; López-Ruiz, 2022).

In sum, the multi-scalar approach reveals the unique contributions of each scale while emphasizing the intrinsic interconnectedness of all scales on a continuum of interactions. Micro-networks provided the foundation for localized cohesion, meso-networks enabled regional integration, and macro-networks facilitated intercultural exchanges. Notably, key inferences at the different scales converged, forming expansive systems that integrated the Mediterranean and Trans-Saharan networks into a unified, dynamic framework. Collectively, these interconnected systems diversified economic, social, and cultural exchanges, demonstrating the expansive reach of these interactions and their ability to bridge vastly diverse ecological and cultural landscapes. In this context, the Libyan Sea emerges not merely as a boundary but as a relational place —a conduit where disparate systems interacted and evolved in response to mutual influence. Moreover, the approach adopted here paves the way for future research to unravel the complex, entangled systems of socioecological and historical trajectories shaped by continuous human-environment interactions across the Mediterranean, Africa, and beyond.

VIII

CONCLUDING REMARKS & FUTURE OF RESEARCH

VIII

CONCLUDING REMARKS & FUTURE OF RESEARCH

Framing the theoretical framework of this research, we emphasized that this exploratory study is grounded in three foundational, interconnected concepts: landscape, interaction, and complexity. The concept of landscape is approached here not only in terms of its physical and ecological characteristics. It is also analyzed through the cognitive and sociocultural perceptions that shape how people inhabit and conceptualize their surroundings in both Crete and Marmarica. By analyzing archaeological site distributions, alongside contextual environmental data, this study identified recurrent patterns of human adaptation to distinct ecological niches. In Crete, these patterns revealed land- and maritime-oriented strategies tied to resource exploitation and the establishment of urban centers, which catalyzed complex forms of interactions, given the island's central position within Mediterranean circuits. In Marmarica, the arid environment required adaptation strategies oriented toward controlling access to water and optimizing trade routes across the northeastern Mediterranean African coast and desert hinterlands. Furthermore, the approach adopted here underscores the utility of integrating multiple scales of analysis thereby showcasing how environmental affordances and human agency interact to shape socioecological and historical trajectories.

From the perspective of interaction, this research modeled historical networks operating within and between Crete and Marmarica across varying spatial and temporal scales. The analysis revealed the dynamic and multi-scalar

nature of these connections, ranging from localized interactions within specific regions to broader regional and long-distance exchanges that connected the Aegean and North Africa. Advanced spatial and network science methods were employed to identify critical nodes and hubs that facilitated the movement of goods, people, and ideas in the past. These results demonstrated that neither Crete nor Marmarica were isolated entities but integral components of a complex and evolving system of multi-scalar relationships shaped by geographic proximity as well as socioeconomic and sociocultural factors.

Finally, the concept of complexity served as a lens through the perspective of landscape and interaction were integrated, enabling the exploration of emergent properties of these societies, such as adaptive settlement patterns and interaction networks. By considering both human and non-human factors, this study demonstrated how co-evolutionary relationships scaled up to create region-wide patterns of complexity. This approach highlighted feedback loops and interdependencies that influenced these systems, illustrating how micro-scale processes contributed to meso- and macro-scale transformations. In doing so, this integrative framework revealed nonlinear relationships between multiple factors, as well as the dynamic evolution of settlement patterns, resource distribution, and interaction processes. Ultimately, the methodology employed contributes to a richer understanding of the interconnected and adaptive nature of these complex systems, offering insight into the interplay between environmental conditions and human agency over the long-term perspective.

In the case of Crete, this research aligns with current theoretical approaches that bridge formalist and constructivist paradigms to interpret landscapes. The application of digital and computational approaches —such as remote sensing, spatial analysis, and network science— enabled a nuanced analysis of associations between anthropogenic and environmental factors, evidencing distinct spatial patterns and relationships, including settlement clustering and their associations with specific key variables. Such results underscore the non-random nature of settlement distributions, highlighting the influence of proximity to productive resources, historical transit routes, and localized environmental features on site locations. This synergy provides a comprehensive understanding of how humans have adapted to, inhabited, and modified their landscapes, revealing the agency of both human and non-human factors in shaping the historical socioecological systems of ancient Crete.

A central contribution of this study lies in its conceptual framework, which bridges the interpretation of "sites" as physical remnants of past activities with "communities" as dynamic social constructs. This dual perspective provides a more comprehensive understanding of the Cretan archaeological record, demonstrating that sites functioned as nodes within broader social and spatial networks. Importantly, this study also applies the concept of habitat as a framework for understanding landscapes from the perspective of their inhabitants. This concept reflects the active development of habitats by both human and non-human agents. Consequently, communities are not understood as isolated entities; instead, they must be recognized as integral components of a complex, interconnected network of interactions, highlighting the adaptive strategies employed by ancient communities to

navigate, exploit their diverse environments, and maintain exchange relationships that sustained social and ecological structures over time.

Similarly, by combining spatial and network science approaches, this research has shed light on how the physical and social landscapes of Crete influenced and were shaped by human dynamics, fostering economic, cultural, and political connections. A key contribution in this regard was the application of the focal mobility network (FMN) methodology, which models potential pathways and identifies corridors of past movements that likely structured historical connectivity across the entire island of Crete. These results reaffirm the centrality of natural topography in facilitating or constraining movement, with strategic corridors —such as those along the northern coast and through the Messara Plain— emerging as pivotal to the island's socioeconomic and sociopolitical integration. Additionally, the identified axes align with traditional routes and reveal new areas of interest, underscoring the potential for further archaeological research.

Building on the network approach, the use of topological metrics —including degree, closeness, and betweenness centrality— offered a deeper understanding of the strategic roles of key nodes and edges within the Cretan networks. Urban centers such as Kydonia, Knossos, Phaistos, Gortyna, Ierapytna, or Palaikastro consistently emerged as hubs of connectivity due to their multifaceted roles in governance, trade, and cultural exchanges. Additionally, insights into the resilience and adaptability of these networks highlighted the robustness of these systems, where strategic routes and connections supported stability and growth despite the challenges posed by Crete's historical evolution.

The multi-scalar and diachronic analyses also demonstrated how the nature and intensity of interactions evolved over time in response to shifting social and environmental contexts. Spatial network models revealed the complexity of hierarchical settlement organization, with larger urban centers exerting influence over smaller communities, as well as interregional dynamics that connected Crete to broader Mediterranean systems of exchange. These models provided crucial insights into both localized and broader regional processes that influenced the island's historical trajectories. The application of advanced digital and computational research methods has proven invaluable in quantifying and testing various hypotheses. While no single test or method offers definitive answers, their combined application generates significant insights into the patterned landscapes that shaped these systems in the Mediterranean world.

The study of Marmarica's spatial patterns equally involved systematic site mapping as well as archaeological network research. The former provided a comprehensive understanding of site distributions, while the latter utilized accumulated cost surface analysis (ACS) and network science techniques to reconstruct and analyze historical mobility and interaction networks. Additionally, a series of quantitative methods were applied to assess spatial relationships, clustering trends, and associations between site locations and key environmental or anthropogenic variables.

As the results indicated, hydrology had a significant impact in shaping Marmarica's landscape. In contrast, variables related to intensity and cost of access from productive areas, as well as the cost associated with historical and FMN routes, did not exhibit significant discriminative power in explaining

settlement location and distribution by comparison. Nonetheless, it is crucial to emphasize the importance of their inclusion in the analytical framework. Productive areas and historical routes, in conjunction with hydrological factors, are key to understanding the historical co-evolution of habitats. Moreover, the consideration of all these variables facilitates a comprehensive exploration of potential influencing factors and enables a holistic understanding of the dynamics underlying Marmarica's spatial patterns.

Furthermore, rather than viewing Marmarican communities as simply divided into sedentary northern populations and nomadic southern groups connected by narrow exchange lines, the results suggest a more integrated and interrelated set of communities. They constituted highly interconnected societies engaged in grazing, agricultural activity, trade, and resource management within complex networks of mobility. Whether they were inhabitants of bustling northeastern African harbors or villagers in hinterlands oasis, interaction strategies were an important factor in sustaining these systems. This perspective moves beyond the traditional model of a symbiotic relationship between nomadic and sedentary groups, emphasizing instead the interwoven networks of human practices and the indispensable knowledge required to manage resource-scarce landscapes. It highlights the application of subsistence techniques and exchange systems that operated along intra- and interregional routes over extended periods. Hence, rather than being defined solely by sociocultural ascriptions, these communities relied on a fluid system of practices, specialized knowledge, and adaptive strategies that allowed them to thrive under challenging environmental conditions.

Following this argument, the results run the risk of presenting an overly deterministic picture, where the human populations simply adapted to their environments. While in the specific case of Marmarica, hydrological agents had a greater role in configuring the archaeological spatial distribution, this cannot simply equate this to environmental determinism. As mentioned in the theoretical framework of this work, the concept of heterarchy applied to understanding complex biocultural systems nuances this perspective. In entangled, non-linear chains of causation, some agents will exert more power over other agents without negating the interacting capacity of the latter. Thus, depending on the context, some agents will be dominant whilst others will be dominated in these chains of causation, but both parts will react to each other. Applied to Marmarica, hydrological agents might exert more dominance than other non-human agents as well as over human agents, but these conditions change over space-time. The spatial configuration does not only respond to the whims of a few non-human agents. Indeed, the distribution of archaeological sites is also an active decision propelled by the human inhabitants of both regions who additionally considered their environment in it. This interplay is all the more important to explain the history of these regions without falling into a reductionist –or foreign– narrative.

From a socioeconomic perspective, sites such as "watering places" in Marmarica and "productive places" in Crete formed networks that shaped settlement strategies and structured trade and exchanges. These networks not only influenced the spatial configuration of significant sites but also contributed to the formation of habitats in both contexts. Importantly, these locations were significant not only as landscape-shapers in a functionalistic manner; their significance precisely points towards understanding them from

a sociocultural perspective. Moreover, the results also suggest past settlement clustering that, in conjunction with cost distance evaluations, might shed light on settlement patterns and historical connectivity trends across maritime and terrestrial connections across the Libyan Sea. The geographical distribution of these clustered sites may indicate more settled ways of living near the poles of socioeconomic attractions such as maritime ports and nearby agricultural lands. Coastal sites, including Kommos in Crete, Marsa Matruh in Egypt, and Tobruk or Menelaus in Libya, alongside inland oases, such as Qara and Siwa in Egypt and Al-Jaghbub in Libya, functioned as attractors within a complex network system. These attractors exerted a significant influence on the organizational structures and spatial relationships of surrounding areas.

Spatial and network models further confirm that coastal areas exhibited greater connectivity than inland zones, with a high concentration of multi-period sites often located within regions of enhanced mobility. These patterns are particularly evident around areas of present-day Khania, Heraklion, Messara, and Mirabello in Crete; Tobruk in Libya; Sollum and Marsa Matruh in Egypt; and to a lesser extent, in the oases of Siwa in Egypt, and Al-Jaghbub in Libya. Additionally, this study identified connections along north–south and east–west axes, linking coastal areas with hinterland territories through short-, medium-, and long-distance communication networks. These results are essential for reconstructing mobility and interaction patterns, which likely shaped settlement and subsistence strategies for communities navigating these landscapes. The spatial distribution of potential archaeological areas, in comparison to historical mobility structures, also reinforce the idea of a preference for settlement near key socioeconomic focal points, such as maritime ports, agricultural lands, and the borders of political territories.

These regions functioned as attractors within a complex network system, facilitating long-term interactions with surrounding territories. Consequently, this settlement patterns underscores the significance of these places, highlighting their long-term socioeconomic and spatial roles within interconnected landscapes.

It is important to note that the mobility models presented here were not conditioned by the presence of archaeological remains and rather yielded from independent modeling: sites' location and distribution were obtained by site mapping through remote aerial survey, whereas the movement and interaction models were obtained by applying accumulated cost surface (ACS) and network science techniques. Consequently, the results have the potential to reflect how movement occurs not just because of human settlements but also due to —in conjunction with— non-human agents. The same reasoning applies to the location of settlements and the spatial structure as a whole. Thus, the convergence of areas that articulate mobility and archaeological sites responds to complex patterns of human–non-human entanglements and not just to "simpler" reasons (e.g., this pathway is here because there is a settlement nearby). Instead, this study exemplifies this by applying approaches from complex systems to study past movements and interaction patterns.

These interpretations are firmly grounded in the theoretical framework. The conceptualization of landscapes, informed by principles of landscape archaeology, undoubtedly shaped the approach to tracing movements and inferring spatial patterns. A key focus lies on examining larger areas, rather than isolated sites, which allows for a better account for the complexity of

contexts and interrelations. This perspective is moreover enriched by adjacent principles from human ecodynamics and historical ecology (HE) that, in this case, nuance some results that would otherwise be too deterministic. These complementary perspectives enhance the understanding of diachronic and multi-scalar socioeconomic/socioecological processes across the societies that inhabited the context of the Libyan Sea. Thus, this study has explored the long-term logic "governing" the spatial structure that shapes Crete's and Marmarica's landscapes. This has been accomplished by putting together different methods and analyses to test various hypotheses that preceded this research. Furthermore, this work has discussed the potential applicability of these approaches to the study of landscapes from a complex systems perspective. Additionally, it has highlighted possible areas of application by incorporating non-human agents into the archaeological analysis of plausible landscapes of (primarily) human movement. This does not mean to bluntly equalize humans and non-humans but to recognize the fluid force of agents across a multiplicity of contexts.

Within this framework, complex systems are characterized by interdependence and feedback between their components, which often exhibit emergent behaviors that cannot be explained by examining individual components in isolation. Connecting the results, this emergence is caused by non-linear dynamics. Think about how these analyses and models embed ecological zones, terrain relief, settlements, pathways or historical resource catchment areas (some of which are constituted by both humans and non-humans). None of these factors, in isolation, can explain the spatial structure exhibited by the entire study area. It is rather the summatory combination (non-linearity) of all of them, measured independently and differently

(heterarchically), that causes the emergence of new behaviors (in this case, human interactions).

Building on this, the movement of goods, people, and ideas through a series of landscapes can be better understood by adopting a complex systems approach, which emphasizes the interdependence and feedback loops within socioecological systems. From this perspective, societies and their dynamics reveal that human agency is shaped by a wide array of interdependent factors, including social, cultural, economic, and environmental influences. This approach underscores socioecological dynamics as the intertwining of human and non-human agents, each exerting mutual influence. Mobility, in this context, emerges as a dynamic phenomenon shaped by environmental and sociocultural entanglements.

Furthermore, drawing on different authors, it has been argued that landscapes are complex systems due to their diachronic, synchronic, agentic, and phenomenological qualities. Consequently, this approach potentially enhances the conceptualization of the landscape by envisioning it as a historical biocultural construction that involves the participation of human and non-human agents, forming historical socio-ecosystems. Moreover, this study has expounded how non-linearity and heterarchy enable a non-historicist understanding of the landscape. Landscapes are not the products of concrete or fixed moments; on the contrary, they are dynamic, in continual, non-linear flux. In other words, they are the product of a flowing genealogy of human–environment entanglements. Similarly, mobility it has being claimed, is to be understood as a dynamic involving humans and non-humans. Although movement comprises many aspects of the human past

(e.g., phenomenological practices, practical movement, trade and exchanges, flow of information —essentially, human interactions), human–environment entanglements occur in every process. Therefore, it is essential for archaeological research to account for such interrelationships.

This research also demonstrated the potential of combining diverse sources, including legacy data and grey literature, proving instrumental in addressing the scarcity of archaeological and historical data in certain understudied areas. Additionally, by leveraging digital and computational research techniques, it was possible to access and cover areas that would otherwise have been inaccessible, significantly expanding the available archaeo-historical information for these regions. It has allowed to compile, evaluate, and systematize heritage data on known archaeological sites while also identifying and recording previously undocumented sites, such as ancient settlements, burial sites, historic resource catchment areas, or traditional paths. Furthermore, by contextualizing each site within its ecological setting, this study has been able to provide a better understanding of settlement patterns, mobility structures, and social dynamics. Not least, it has also identified environmental indicators that contribute to a holistic understanding of human-environment interactions and the biocultural heritage that they represent.

As a result, this research represents the first study for the area to offer quantitative answers at such a large scale, offering a methodological and conceptual foundation for future investigations. Nevertheless, while the results are promising, their exploratory nature underscores the need for ongoing refinement through additional data collection and archaeological

fieldwork. Future research points to the need for "co-joint efforts" to shed more light on the coevolutionary history of crucial regions. Therefore, the fields of "traditional" archaeology and computational/digital archaeology (or archaeoinformatics) should work together. In such endeavors, especially those relying on remote methods, researchers must consider that they are often working with published materials and remotely generated data, both of which come with their potentials and limitations. This might be obvious (and generations of archaeologists have done so for centuries); however, when big datasets are created from various sources, the questions of uncertainty and accuracy remain difficult.

Even though this study thoroughly ponders and evaluates the diverse variants and models applied, the results for any historical questions –about changes, shifts, developments, changing connectivity, economic relations– should not be definitively answered. This is not a negative; however, the danger is that they seem to be answered. Computational models and their variations can serve to test, validate, refine, or establish hypotheses about the archaeological features of the landscapes of Crete and Marmarica, along with their specific socioecological systems, but hold only truly accurate if verified with (at least) some ground evidence. We contend that transparency and open communication enhance the value of this work by explicitly addressing the possibilities and limitations inherent in such approaches. Therefore, despite the tangible results achieved, one of the main objectives of this study has been to provide a framework to guide future fieldwork strategies. Hence, this approach aims to support the development of region-specific studies and interventions, both for this project and for others currently conducting

fieldwork, particularly in areas where limited field information hinders accurate assessment.

Consequently, during the course of this research, archaeological fieldwork has been conducted in Crete since 2019 as part of the Sissi Archaeological Project (https://sarpedon.be/). Additionally, since 2021, there has been ongoing collaboration with the Middle Kingdom Theban Project (https://thebanproject.com/en/) in Luxor, Egypt, as part of its field research team. These efforts aim to build progressively the expertise required for future archaeological fieldwork projects.

Future research may prioritize areas such as the southern corner of western Crete (Kantanos-Selino), the inner parts of the Messara Plain, and the Ierapetra area, which are likely to be of particular interest for archaeological fieldwork based on the results. The case of Marmarica warrants special attention due to its understudied nature. Two potential areas for future fieldwork have been identified in this region: the coastal stretch from the Bay of Sollum to the Roman fort of Zawiyet el Agdab, and the hinterlands of Siwa, both of which stand out as particularly promising. Further exploration could also target east–west routes in Marmarica, aiming to identify and verify ancient routes through field surveys at key cistern sites and waypoints. Such surveys might help identify a route system parallel to the coast between the Nile Valley and Cyrenaica. The sites of Quseir el Husan, Quseir Abu Tabaq, Quseir el Gawrabi el Bahari, Quseir el Awtari, and the locality of Qaret Iskandar, located east of the Masrab el Istabl, are assumed to be key waypoints for desert traffic routes despite lacking water supply and, therefore, deserve further field study.

If new data becomes available, this study could be further enriched by incorporating additional variables, assessing seasonality, considering burial sites, and examining numerous types of productive areas. Furthermore, differentiating between the types of routes and analyzing their respective influences on settlement and interaction patterns will provide a more nuanced understanding of past mobility networks. Not all routes are alike, nor do their spatial distributions necessarily result from a single cause.

Beyond addressing specific historical questions, this research contributes to a broader understanding of historical human-environment interactions, offering insights relevant to contemporary anthropogenic and environmental challenges. Historical examples of sustainable and adaptive landscape management provide valuable pathways for balancing societal advancement with ecological stewardship. Understanding historical dynamics thus offers critical lessons for navigating present-day crises. By examining past interactions between human societies and their environments, this study sheds light on adaptive strategies, resilience, and the systemic factors shaping socioecological trajectories over time. Additionally, it highlights historical patterns of human mobility that, while distinct from modern globalized frameworks, exemplify sustainable and adaptable methods for traversing challenging environments without causing irreversible ecological damage.

These results emphasize the importance of developing human systems that operate in harmony with ecosystems, promoting sustainable and flexible practices for societal advancement. By demonstrating the enduring relevance of historical analysis in addressing modern challenges, this research advocates for a more holistic approach to sustainable solutions. A central

contribution of this research is its integration of digital data management models, including advanced risk assessment methods using machine learning, designed to ensure the secure identification, preservation (digital), and dissemination of archaeological and cultural heritage data.

Another critical aspect of this study is its commitment to ethical research practices grounded in the principles of Open Science. By promoting accessibility, transparency, and collaboration, these principles ensure that scientific knowledge is freely available to all. To this end, digital methodologies have been employed that adhere to Open Data standards, built upon three fundamental pillars: accessibility, FAIR+LOUD data principles, and open methodologies. These practices not only democratize access to data but also address epistemological concerns about biases introduced by limited accessibility. Sharing data mitigates these challenges, emphasizing the importance of making data, methods, and results widely accessible while fostering transparency, reproducibility, and ethical scholarship across diverse disciplinary contexts. Open practices facilitate critical reanalysis and knowledge sharing, enabling more comprehensive and transparent scientific endeavors. By treating research data as a public good, this work challenges monopolistic tendencies in knowledge production and underscores the societal value of free and open access. Furthermore, the integration of open digital methods and techniques in the study of archaeological and cultural heritage promotes networked knowledge creation, strengthening interdisciplinary communication and innovation. In the contemporary landscape of archaeological research, web information systems have emerged as pivotal tools for effective data management, accessibility, and dissemination. This study, emphasizing open data principles and innovative

approaches to historical heritage management, also leveraged web information systems to amplify its impact.

Thus, this dissertation not only meets its original research objectives but also contributes to the development of open and sustainable methodologies for data management, (digital) preservation, and dissemination. Inspired by Open Science principles, it seeks to bridge the gap between academic research and broader societal engagement, ensuring that the knowledge produced is accessible, usable, and relevant to both scholarly communities and society at large. By situating past human-environment interactions within a complex systems framework and embracing open, collaborative practices, this work aims to inform future research, guide fieldwork priorities, and inspire more holistic approaches to studying the past, present, and future interconnections of human societies.

In conclusion, the long-term occupation and interaction patterns observed in Crete and Marmarica reflect constant negotiations between human societies and their environments —i.e., human and non-human factors, mediated by and shaped through— expanding or contracting networks that connect local and distant communities. In turn, these networks and environmental interactions contribute to processes of social evolution, with complexity rising, peaking, and sometimes declining as societies respond to both internal dynamics (e.g., population growth, political centralization) and external factors (e.g., climatic shifts, trade route disruptions). Recognizing the non-linear, cyclical, and multi-scalar nature of these processes underscores the importance of integrated approaches that draw upon archaeological evidence, environmental *proxies*, and spatial modeling. Furthermore, employing open

and ethically grounded research practices —which ensure transparency, accessibility, and reproducibility— secures that the resulting data and interpretations are available for future scholars. This fosters ongoing reanalysis and open dialogue regarding the deep-time dynamics of Mediterranean and North African worlds.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias

Abdollah, M. O. (2022). *Trade centers and trade routes in Upper Egypt, during the Old and Middle Kingdoms*. Golden House Publications.

Abou-Zeid, A. M. (1959). The sedentarization of nomads in the Western Desert of Egypt. *International Social Science Journal, 11*(4), 550–558.

Aceituno, F. J., & Uriarte, A. (2019). Conectando un territorio: Simulación de rutas de movilidad entre cazadores-recolectores y primeros cultivadores. El caso del Cauca medio (Macizo Volcánico, Colombia). *Estudios de Prehistoria y Arqueología Madrileñas, 12*, 175–192.

Acosta Naranjo, R., & Domínguez, G. P. (2014). Ecoantropología: Hacia un enfoque holista de las relaciones ambiente-sociedad. En *Periferias, Fronteras y Diálogos. Actas del XIII Congreso de Antropología de la Federación de Asociaciones de Antropología del Estado Español* (pp. 2835–2858). Tarragona: Universitat Rovira i Virgili.

Adamopoulos, E., & Rinaudo, F. (2020). UAS-based archaeological remote sensing: Review, meta-analysis and state-of-the-art. *Drones, 4*(3), 46.

Adams, R. McC. (1966). *The evolution of urban society: Early Mesopotamia and prehispanic Mexico*. Aldine Publishing Company.

Agapiou, A., Alexakis, D. D., Sarris, A., & Hadjimitsis, D. G. (2014). Evaluating the potentials of Sentinel-2 for archaeological perspective. *Remote Sensing, 6*(3), 2176–2194. https://doi.org/10.3390/rs6032176

Alberti, G. (2019). *movecost: An R package for calculating accumulated slope-dependent anisotropic cost-surfaces and least-cost paths*. *SoftwareX, 10*, 100331. https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100331

Aldenderfer, M. (1998). Quantitative methods in archaeology: A review of recent trends and developments. *Journal of Archaeological Research, 6*(2), 91–120.

Aldenderfer, M., & Maschner, H. D. G. (1996). *Anthropology, space, and geographic information systems*. Oxford: Oxford University Press.

Alexander, P. H. (2013). Thoughts about open access publishing in a humanities context. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies, 1*(1), 97–98. https://www.muse.jhu.edu/article/501745

Allen, K. M. S., Green, S. W., & Zubrow, E. B. (1990). *Interpreting space: GIS and archaeology*. London: Taylor & Francis.

Allison, P. (2008). Dealing with legacy data—An introduction. *Internet Archaeology, 24*. https://doi.org/10.11141/ia.24.8

Amato, V., Longo, F., Bredaki, M., Rossi, A., Ghilardi, M., Psomiadis, D., Colleu, M., Sinibaldi, L., Delanghe-Sabatier, D., Demory, F., & Petit, C. (2014). Geoarchaeological and palaeoenvironmental research in the area of Ancient Phaistos (Crete, Greece): Preliminary results. En G. Touchais, R.

Laffineur, & F. Rougemont (Eds.), *L'environnement naturel et la relation homme-milieu dans le monde égéen protohistorique* (Vol. 37, pp. 129–140). Aegaeum Series.

Andreou, G. M., Nikolaus, J., Westley, K., El Safadi, C., Blue, L., Smith, A., & Breen, C. (2022). Big data in maritime archaeology: Challenges and prospects from the Middle East and North Africa. *Journal of Field Archaeology, 47*(2), 131–148. https://doi.org/10.1080/00934690.2022.2028082

Angelakis, A. N., & Vavoula, G. (2012). Evolution of urban hydro-technologies in Crete, Hellas through the centuries. En *Protection and Restoration of the Environment XI, CD Proceedings and Book of Abstracts* (p. 323). Thessaloniki, Hellas.

Anthony, F. B. (2016). *Foreigners in Ancient Egypt: Theban Tomb Paintings from the Early Eighteenth Dynasty*. Bloomsbury Academic.

Antoniadis, V. (2024). *Exploring optimal paths, slope-dependent functions and digital elevation models in the greater Knossos area*. *Journal of Greek Archaeology*, 9, 109–122.

Arnaud, P. (2005). *Les routes de la navigation antique: Itinéraires en Méditerranée*. Errance.

Archaeology Data Service (ADS). (s.f.). Recuperado el 01 de junio de 2024, de https://archaeologydataservice.ac.uk/

Ashmore, W. (2007). Social archaeologies of landscape. En S. H. Lekson (Ed.), *The Architecture of Chaco Canyon, New Mexico* (pp. 179–198). University of Utah Press.

Ashmore, W., & Knapp, A. B. (1999). *Archaeologies of Landscape: Contemporary Perspectives*. New Jersey, USA: Blackwell Publishers.

Atici, L., Witcher Kansa, S., Lev-Tov, J., & Kansa, E. C. (2013). Other people's data: A demonstration of the imperative of publishing primary data. *Journal of Archaeological Method and Theory, 20*(4), 663–681.

Awaida, A., Westervelt, J., & de Mouveaux, P. (2015). GRASS GIS manual: r.cost. https://grass.osgeo.org/grass70/manuals/r.cost.html.

Awad, M. (1954). The assimilation of nomads in Egypt. *Geographical Review, 44*(2), 240–252. https://doi.org/10.2307/212358

Baddeley, A. J., Rubak, E., & Turner, R. (2015). *Spatial point patterns: Methodology and applications with R*. Chapman and Hall/CRC Press. https://doi.org/10.1201/b19708

Baena Preysler, J., Blasco Bosqued, M. C., & Quesada Sanz, F. (1997). *Los SIG y el análisis espacial en arqueología*. Universidad Autónoma de Madrid.

Bagnall, R. S. (2006). *Hellenistic and Roman Egypt: Sources and Approaches*. Ashgate Publishing.

Bagnall, R. S. (Ed.). (2021). *Roman Egypt: A history*. Cambridge University Press.

Bagnold, R. A. (1935). *Libyan Sands*. London: Hodder and Stoughton.

Balée, W. (2006). The research program of historical ecology. *Annual Review of Anthropology, 35*, 75-98. https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.35.081705.123231

Balée, W. (Ed.). (1998). *Advances in historical ecology*. New York: Columbia University Press.

Barabási, A.-L. (2002). *Linked: The new science of networks*. Cambridge, MA: Perseus Publishing.

Barabási, A.-L. (2012). *Network science*. Cambridge University Press.

Barceló, J. A. (2017a). Arqueología cuantitativa: Más allá de una simple técnica. En D. Jiménez-Badillo (Ed.), *Arqueología computacional. Nuevos enfoques para la documentación, análisis y difusión del patrimonio cultural* (pp. 21–38). Ciudad de México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Barceló, J. A. (2017b). Using computational methods to understand the past in the present. *Global Journal of Archaeology and Anthropology, 1*(2), 555-558. https://doi.org/10.19080/GJAA.2017.01.555558

Barceló, J. A., & Bogdanovic, I. (Eds.). (2015). *Mathematics and archaeology* (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b18530

Barceló, J. A., Achino, K. F., Bogdanovic, I., Capuzzo, G., Del Castillo, F., Moitinho de Almeida, V., & Negre, J. (2015). Measuring, counting and explaining: An introduction to mathematics in archaeology. En J. A. Barceló & I. Bogdanovic (Eds.), *Mathematics and archaeology* (pp. 3–64). Boca Raton, FL: CRC Press.

Barker, G., Gilbertson, D., Jones, B., & Mattingly, D. (Eds.). (1996). *Farming the desert: Gazetteer and pottery*. Cambridge University Press.

Barker, S. F. (2020). *Induction and hypothesis: A study of the logic of confirmation*. Cornell University Press. https://doi.org/10.7591/9781501741173

Barnard, H., & Wendrich, W. (Eds.). (2008). *The archaeology of mobility: Old World and New World nomadism*. Los Angeles: The Cotsen Institute of Archaeology at UCLA.

Barratt, M. (2000). OASIS: Online access to the index of archaeological investigations. *Archaeology Data Service, 8*. http://ads.ahds.ac.uk/newsletter/issue8.html

Barruezo-Vaquero, P., & Laguna-Palma, D. (2022). On the integration of landscape archaeology within the framework of human ecodynamics: Some theoretical considerations. En *Diversity in Archaeology: Proceedings of the Cambridge Annual Student Archaeology Conference 2020/2021* (pp. 339-358). Archaeopress Publishing Ltd.

Barthelemy, M. (2011). Spatial networks. *Physics Reports, 499*(1–3), 1–101. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.11.002

Barton, C. M. (2014). Complexity, social complexity, and modeling. *Journal of Archaeological Method and Theory, 21*(2), 306-324. https://doi.org/10.1007/s10816-013-9187-2

Barton, D. N., Kuikka, S., Varis, O., Uusitalo, L., Henriksen, H. J., Borsuk, M., de la Hera, A., Farmani, R., Johnson, S., & Linnell, J. D. C. (2012). Bayesian networks in environmental and resource management. *Integrated Environmental Assessment and Management, 8*(3), 418–429. https://doi.org/10.1002/ieam.1327

Bates, O. (1914). *The Eastern Libyans: An essay*. London: Macmillan.

Bates, O. (1915). Ethnographic notes from Marsa Matruh. *Journal of the Royal Asiatic Society of Great Britain and Ireland, 47*(4), 717–739. https://doi.org/10.1017/S0035869X00048802

Bates, O. (1927). Excavations at Marsa Matruh. *Harvard African Studies, 8*, 124–200.

Bauer, A. M. (2018). Questioning a posthumanist political ecology: Ontologies, environmental materialities, and the political in Iron Age South India. *Archaeological Papers of the American Anthropological Association, 29*, 157–174.

Bauer, A. M., & Ellis, E. C. (2018). The Anthropocene divide: Obscuring understanding of social-environmental change. *Current Anthropology, 59*, 209–227.

Bauer-Clapp, H., & Kirakosian, K. (2017). Archaeologists and archives: Revisiting an old challenge. *Advances in Archaeological Practice, 5*(3), 220–226. https://doi.org/10.1017/aap.2017.16

Baxter, M. (1994). *Exploratory multivariate analysis in archaeology*. Edinburgh, UK: Edinburgh University Press.

Baxter, M. J. (2003). *Statistics in archaeology*. Arnold.

Beaudry, M. C., & Parno, T. G. (Eds.). (2013). *Archaeologies of mobility and movement*. New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6211-8

Bell, T., & Lock, G. (2000). Geografía y tecnologías en arqueología. En G. Lock (Ed.), *Beyond the map: Archaeology and spatial technologies* (pp. 45–72). IOS Press.

Bennett, J. E. (2019). *The Archaeology of Egypt in the Third Intermediate Period*. Cambridge University Press.

Bennett, R., Cowley, D., & De Laet, V. (2014). The data explosion: Tackling the taboo of automatic feature recognition in airborne survey data. *Antiquity, 88*(342), 896–905.

Bentley, R. A. (2003). An introduction to complex systems. En R. A. Bentley & H. D. G. Maschner (Eds.), *Complex systems and archaeology*. Salt Lake City: University of Utah Press.

Bentley, R. A., & Maschner, H. D. G. (2003). *Complex systems and archaeology*. Salt Lake City: University of Utah Press.

Bentley, R. A., & Maschner, H. D. G. (2007). Complexity theory. En R. A. Bentley, H. D. G. Maschner, & C. Chippindale (Eds.), *Handbook of archaeological theories* (pp. 245–270). AltaMira Press.

Bernabeu Aubán, J., Moreno Martín, A., & Barton, C. M. (2012). Complex systems, social networks and the evolution of social complexity. En M. Berrocal, L.

García Sanjuán, & A. Gilman (Eds.), *The prehistory of Iberia: Debating early social stratification and the state* (pp. 23–37). New York, NY: Routledge.

Berners-Lee, T. (2023). 5 Stars data. https://5stardata.info/en/. Recuperado el 1 de noviembre de 2024.

Berners-Lee, T., Hendler, J., & Lassila, O. (2001). The Semantic Web: A new form of web content that is meaningful to computers will unleash a revolution of new possibilities. *Scientific American, 284*(5), 34–43.

Besson, A. (2017). Building a Paradise? On the Quest for the Optimal Human Habitat. *Contemporary Aesthetics (Journal Archive), 15*, 8.

Bevan, A. (2020). Spatial point patterns and processes. En M. Gillings, P. Hacıgüzeller, & G. Lock (Eds.), *Archaeological spatial analysis: A methodological guide* (pp. 60-76). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781351243858

Bevan, A., & Conolly, J. (2013). *Mediterranean islands, fragile communities and persistent landscapes: Antikythera in long-term perspective*. Cambridge: Cambridge University Press.

Bevan, A., & Lake, M. (Eds.). (2013). *Computational approaches to archaeological spaces*. Walnut Creek, CA: Left Coast Press.

Bevan, A., & Wilson, A. (2013). Models of settlement hierarchy based on partial evidence. *Journal of Archaeological Science, 40*(5), 2415–2427. https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.12.025

Bewley, R., Rayne, L., Howard, A., & Kennedy, D. (2016). Endangered archaeology in the Middle East and North Africa: Introducing the EAMENA project. *Bulletin of the Council for British Research in the Levant, 11*(1), 55–62.

Bickler, S. H. (2021). Machine learning arrives in archaeology. *Advances in Archaeological Practice, 9*(2), 186-191. https://doi.org/10.1017/aap.2021.6

Biggs, R., Schlüter, M., & Schoon, M. L. (Eds.). (2015). An introduction to the resilience approach and principles to sustain ecosystem services in social-ecological systems. En *Principles for building resilience: Sustaining ecosystem services in social-ecological systems* (pp. 1–31). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781316014240.002

Binford, L. R. (1964). A consideration of archaeological research design. En S. R. Binford & L. R. Binford (Eds.), *New perspectives in archaeology* (pp. 313–341). Chicago: Aldine.

Binford, L. R. (1982). The archaeology of place. *Journal of Anthropological Archaeology, 1*, 5–31. https://doi.org/10.1016/0278-4165(82)90006-X

Binford, L. R. (1968). *New perspectives in archaeology*. Aldine.

Binford, L. R. (1962). Archaeology as anthropology. *American Antiquity, 28*(2), 217–225. https://doi.org/10.2307/278380

Binford, L. R. (1964). A consideration of archaeological research design. *American Antiquity, 29*(4), 425–441.

Bintliff, J. L. (1991). *The Annales school and archaeology*. Leicester University Press.

Bintliff, J. L. (1997). Catastrophe, chaos and complexity: The death, decay and rebirth of towns from antiquity to today. *Journal of European Archaeology, 5*(2), 67–90.

Bintliff, J. L., & Snodgrass, A. M. (1988). Off-site pottery distributions: A regional and interregional perspective. *Current Anthropology, 29*(3), 506–513.

Blackman, D. J., & Branigan, K. (1975). An archaeological survey on the south coast of Crete, between the Ayiofarango and Chrisostomos. *The Annual of the British School at Athens, 70*, 17–36.

Blackman, D., & Branigan, K. (1977). An archaeological survey of the lower catchment of the Ayiofarango valley. *The Annual of the British School at Athens, 72*, 13–84.

Blake, E. (2002). Spatiality past and present: An interview with Edward Soja. Los Angeles, 12 April 2001. *Journal of Social Archaeology, 2*(2), 139–158.

Blake, E. (2004). Space, spatiality and archaeology. En L. Meskell & R. W. Preucel (Eds.), *A companion to social archaeology* (pp. 230–254). Blackwell Publishing.

Boardman, J. (1980). *The Greeks overseas: Their early colonies and trade* (New and enlarged edition). Thames and Hudson.

Borgatti, S. P., Carley, K. M., & Krackhardt, D. (2006). On the robustness of centrality measures under conditions of imperfect data. *Social Networks, 28*(2), 124–136.

Bottema, S. (1980). Palynological investigations on Crete. *Review of Palaeobotany and Palynology, 31*(1–2), 193–217. https://doi.org/10.1016/0034-6667(80)90027-5

Bottema, S., & Woldring, H. (1990). Anthropogenic indicators in the pollen record of the eastern Mediterranean. En S. Bottema, G. Entjes-Nieborg, & W. van Zeist (Eds.), *Man's role in the shaping of the eastern Mediterranean landscape* (pp. 231–264). A.A. Balkema.

Bowen, E. F. W., Tofel, B. B., Parcak, S., & Granger, R. (2017). Algorithmic identification of looted archaeological sites from space. *Frontiers in ICT, 4*. https://doi.org/10.3389/fict.2017.00004

Brandes, U., & Wagner, D. (2018). Visone: Release 2.24.1. *Visone Project*.

Brandes, U., Robins, G., McCranie, A., & Wasserman, S. (2013). What is network science? *Network Science, 1*(1), 1–15.

Branigan, K. (1973). Crete, the Levant and Egypt in the Early Second Millennium B.C. En *Proceedings of the 3rd International Cretological Congress* (pp. 22–27). Athens.

Braudel, F. (2019). *El Mediterráneo y el mundo mediterráneo en la época de Felipe II* (Tomo I, 3ª ed., Mario Monteforte Toledo, W., Roces, W., Simón, V., & Ortiz, A., Trads.). Fondo de Cultura Económica.

Breen, C., Blue, L., Andreou, G. M., El Safadi, C., Huigens, H. O., Nikolaus, J., Ortiz-Vazquez, R., Ray, N., Smith, A., Tews, S., & Westley, K. (2022).

Documenting, protecting and managing endangered maritime cultural heritage in the Middle East and North Africa (MENA) region. *Journal of Maritime Archaeology, 17*, 341–352. https://doi.org/10.1007/s11457-022-09338-z

Broodbank, C. (2000). *An island archaeology of the early Cyclades*. Cambridge University Press.

Broodbank, C. (2013). *The making of the Middle Sea: A history of the Mediterranean from the beginning to the emergence of the Classical world*. Thames & Hudson.

Browne, W. G. (1799). *Travels in Africa, Egypt and Syria, from the years 1792 to 1798*. London: Adell and Davies.

Bruck, J. (2005). Experiencing the past? The development of a phenomenological archaeology in British prehistory. *Archaeological Dialogues, 12*(1), 45–72.

Brughmans, T. (2010). Connecting the dots: Towards archaeological network analysis. *Oxford Journal of Archaeology, 29*(3), 277–303.

Brughmans, T. (2013). Thinking through networks: A review of formal network methods in archaeology. *Journal of Archaeological Method and Theory, 20*(4), 623–662. https://doi.org/10.1007/s10816-012-9133-8

Brughmans, T., & Laguna-Palma, D. (2023). Una introducción a la investigación de redes en arqueología: ¿Qué es y por qué la necesitamos? *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada, 33*, 11–32. https://doi.org/10.30827/cpag.v33i0.27790

Brughmans, T., Mills, B. J., Munson, J. L., & Peeples, M. A. (Eds.). (2023). *The Oxford handbook of archaeological network research*. Oxford: Oxford University Press.

Brughmans, T., & Peeples, M. A. (2017). Trends in archaeological network research: A bibliometric analysis. *Journal of Historical Network Research, 1*(1), 1–24.

Brughmans, T., & Peeples, M. A. (2018). Network science. In S. L. Kuhn (Ed.), *The encyclopedia of archaeological sciences*. John Wiley & Sons.

Brughmans, T., & Peeples, M. A. (2020). Spatial networks. En M. Gillings, P. Hacıgüzeller, & G. Lock (Eds.), *Archaeological spatial analysis: A methodological guide* (pp. 273–295). Routledge.

Brughmans, T., & Peeples, M. A. (2023). *Network science in archaeology*. Cambridge University Press.

Bruins, H. J. (2006). Desert environment and geoarchaeology of the Wadi Arabah. En P. Bienkowski & K. Galor (Eds.), *Crossing the Rift: Resources, Routes, Settlement Patterns and Interaction in the Wadi Arabah* (pp. 29–43). Oxbow Books.

Buccellati, G. (2017). *A critique of archaeological reason: Structural, digital, and philosophical aspects of the excavated record*. Cambridge University Press.

Buchhorn, M., Lesiv, M., Tsendbazar, N.-E., Herold, M., Bertels, L., & Smets, B. (2020). Copernicus global land cover layers — Collection 2. *Remote Sensing, 12*(6), 1044.

Buxó, R. (2006). Paisajes culturales y reconstrucción histórica de la vegetación. *Ecosistemas, 15*, 1–6.

Buxó, R., McGlade, J., Palet, J. M., & Picazo, M. (1998). La evolución del paisaje cultural: La estructuración a largo plazo del espacio social en el Empordà. *Arqueología Espacial: Arqueología del Paisaje, 19–20*, 399–414.

Callon, M., & Law, J. (2004). Guest editorial. *Environment and Planning D: Society and Space, 22*(1), 3–11.

Campana, S. (2017). Drones in archaeology: State-of-the-art and future perspectives. *Archaeological Prospection, 24*(4), 275–296.

CARE. Principles for Indigenous Data Governance. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://www.gida-global.org/care

Cardiff University.*Spatial Design Network Analysis (sDNA)*. Recuperado el 6 de noviembre de 2024, de https://sdna.cardiff.ac.uk/sdna/

Carlson, D. L. (2017). *Quantitative methods in archaeology using R*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Carreras, C., & De Soto, P. (2013). The Roman transport network: A precedent for the integration of European mobility. *Historical Methods: A Journal of Quantitative and Interdisciplinary History, 46*(3), 117–133. https://doi.org/10.1080/01615440.2013.803403

Carreras, C., De Soto, P., & Muñoz, A. (2019). Land transport in mountainous regions in the Roman Empire: Network analysis in the case of the Alps and Pyrenees. *Journal of Archaeological Science: Reports, 25*, 280–293. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.04.011

Carrero-Pazos, M. (2017). *El fenómeno tumular y megalítico en Galicia: Aportaciones desde los sistemas de información geográfica y la estadística espacial para el estudio de los patrones de localización* (Tesis doctoral). Universidad de Santiago de Compostela.

Carrero-Pazos, M. (2023). *Arqueología computacional del territorio: Métodos y técnicas para estudiar decisiones humanas en paisajes pretéritos*. Archaeopress.

Carto. (s.f.). Recuperado el 9 de agosto de 2024, de https://carto.com/

Carvajal López, J. C. (2021). Long-term patterns of nomadic and sedentary settlement in the crowded desert of north-west Qatar. En P. Dixon & C. Theune (Eds.), *Seasonal Settlement in the Medieval and Early Modern Countryside* (pp. 285–295). Sidestone Press.

Casana, J. (2015). Satellite imagery-based analysis of archaeological looting in Syria. *Near Eastern Archaeology, 78*(3), 142–152.

Casana, J. (2020). Global-scale archaeological prospection using CORONA satellite imagery: Automated, crowd-sourced, and expert-led approaches. *Journal of Field Archaeology, 45*(S1), S89–S100.

Casana, J., & Cothren, J. (2013). The CORONA Atlas Project: Orthorectification of CORONA satellite imagery and regional-scale archaeological exploration in the Near East. En D. C. Comer & M. J. Harrower (Eds.), *Mapping archaeological landscapes from space* (pp. 33–43). *Springer Briefs in Archaeology* (Vol. 5). Springer.

Casana, J., & Laugier, E. J. (2017). Satellite imagery-based monitoring of archaeological site damage in the Syrian Civil War. *PLoS ONE, 12*, e0188589.

Casey, E. S. (1996). How to get from space to place in a fairly short stretch of time: Phenomenological prolegomena. En S. Feld & K. H. Basso (Eds.), *Senses of place* (pp. 13–52). Santa Fe, NM: School of American Research Press.

Castiello, M. E. (2022). *Computational and machine learning tools for archaeological site modeling*. Cham, Switzerland: Springer.

Catalán González, F. J., Aragón Núñez, E., & Trapero Fernández, P. (2023). Conectividad y movilidad en la Bahía de Cádiz durante la antigüedad a través de los sistemas de información geográfica: Una propuesta metodológica. En *GIS Applications in Roman Landscape and Territory: Methodologies and Models in Hispania* (pp. 187–200). *BAR International Series*. Archaeopress.

Chalikias, K., & Oddo, E. (Eds.). (2019). *Exploring a Terra Incognita on Crete: Recent Research on Bronze Age Habitation in the Southern Ierapetra Isthmus*. INSTAP Academic Press.

Chaniotis, A. (1999). Milking the mountains: Economic activities on the Cretan uplands in the Classical and Hellenistic period. En A. Chaniotis (Ed.), *From Minoan farmers to Roman traders: Sidelights on the economy of ancient Crete* (pp. 181–220). Franz Steiner Verlag.

Chapman, R. (2003). *Archaeologies of complexity*. Routledge.

Chapman, H. (2006). *Landscape archaeology and GIS*. Stroud: Tempus Publishing.

Chapman, R. (2007). Evolution, complexity and the state. En S. Kohring & S. Wynne-Jones (Eds.), *Socialising complexity: Structure, interaction and power in archaeological discourse* (pp. 13–28). Oxbow Books.

Chartzoulakis, K. S., Paranychianakis, N. V., & Angelakis, A. N. (2001). Water resources management in the Island of Crete, Greece, with emphasis on the agricultural use. *Water Policy, 3*(3), 193–205. https://doi.org/10.1016/S1366-7017(01)00012-5.

Cherry, J. F. (2003). Archaeology beyond the site: Regional survey and its future. En J. K. Papadopoulos & R. M. Leventhal (Eds.), *Theory and practice in Mediterranean archaeology: Old World and New World perspectives* (pp. 137–159). Los Angeles: Cotsen Institute of Archaeology, UCLA.

Cherry, J. F., & Leppard, T. P. (2014). Patterning and its causation in the pre-Neolithic colonization of the Mediterranean islands (Late Pleistocene to early Holocene). *Journal of Island and Coastal Archaeology, 9*(2), 191–206.

Cherry, J. F., Davis, J. L., Demitrack, A., Mantzourani, E., Strasser, T. F., & Talalay, L. E. (1988). Archaeological survey in an artifact-rich landscape: A middle Neolithic example from Nemea, Greece. *American Journal of Archaeology, 92*(2), 159–176.

Chevrollier, F. (2016). From Cyrene to Gortyn: Notes on the relationship between Crete and Cyrenaica under Roman domination (1st century BC–4th century AD). In J. E. Francis & A. Kouremenos (Eds.), *Roman Crete: New Perspectives* (pp. 11–26). Oxbow Books.

Childe, V. G. (1950). The urban revolution. *Town Planning Review, 21*(1), 3–17.

Childress, E., & Jul, E. (2003). Going grey: Grey literature and metadata. *Journal of Internet Cataloging, 6*(3), 3–6. https://doi.org/10.1300/J141v06n03_02

Chirikure, S. (2013). Heritage conservation in Africa: The good, the bad, and the challenges. *South African Journal of Science, 109*(1/2), 1–3. https://doi.org/10.1590/sajs.2013/a003.

Christopoulou, A., Özarslan, Y., Elzanowska, A., Moody, J., Tsakanika, E., & Ważny, T. (2023). Dendroarchaeology in Greece – From humble beginnings to promising future. *Dendrochronologia, 80*, 126110. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126110.

Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Ediciones Rialp.

Citter, C. (2019). Digital technologies and the shift towards computerized reasoning in archaeology. En *Proceedings of the Annual Conference on Digital Archaeology*. Springer International Publishing.

Clarke, D. L. (1973). Archaeology: The loss of innocence. *Antiquity, 47*(185), 6–18.

Clarke, D. L. (1977a). *Analytical archaeology* (2nd ed.). London, UK: Methuen & Co.

Clarke, D. L. (Ed.). (1977b). *Spatial archaeology*. London, UK: Academic Press.

Cline, E. H. (1999). The nature of the economic relations of Crete with Egypt and the Near East during the Late Bronze Age. En A. Chaniotis (Ed.), *From Minoan Farmers to Roman Traders: Sidelights on the Economy of Ancient Crete* (pp. 115–144). Franz Steiner Verlag.

Cline, E. H. (2009). *Sailing the wine-dark sea: International trade and the Late Bronze Age Aegean*. BAR International Series.

Cline, E. H., & Harris-Cline, D. (Eds.). (1998). *The Aegean and the Orient in the Second Millennium: Proceedings of the 50th Anniversary Symposium, Cincinnati, 18–20 April 1997* (Aegaeum 18). Université de Liège, Histoire de l'art et archéologie de la Grèce antique; University of Texas at Austin, Program in Aegean Scripts and Prehistory.

Coble, Z., Potvin, S., & Shirazi, R. (2014). Process as product: Scholarly communication experiments in the digital humanities. *Journal of Librarianship and Scholarly Communication, 2.* https://doi.org/10.7710/2162-3309.1137

Coccia, M. (2018). An introduction to the methods of inquiry in social sciences. *Journal of Social and Administrative Sciences, 5*(2), 116–126.

Cole, D. P., & Altorki, S. (1998). *Bedouin, settlers, and holiday-makers: Egypt's changing northwest coast*. Cambridge University Press.

Collar, A. (2013). *Religious Networks in the Roman Empire: The Spread of New Ideas*. Cambridge University Press.

Collar, A., Coward, F., Brughmans, T., & Mills, B. J. (2015). Networks in archaeology: Phenomena, abstraction, representation. *Journal of Archaeological Method and Theory, 22*(1), 1–32. https://doi.org/10.1007/s10816-014-9235-6

Comer, D. C., & Harrower, M. J. (Eds.). (2013). *Mapping archaeological landscapes from space*. New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6074-9

Conolly, J., & Lake, M. (2009). *Sistemas de información geográfica aplicados a la arqueología*. Barcelona: Bellaterra.

Constantakopoulou, C. (2007). *The dance of the islands: Insularity, networks, the Athenian Empire, and the Aegean world*. Oxford University Press.

Contreras, D. A. (2017). Correlation is not enough – Building better arguments in the archaeology of human-environment interactions. En D. A. Contreras (Ed.), *The archaeology of human-environment interactions: Strategies for investigating anthropogenic landscapes, dynamic environments, and climate change in the human past* (pp. 3–22). London and New York: Routledge.

Conway, M. (2021). Assemblages and social complexity: Rethinking agency and materiality in archaeology. *Journal of Archaeological Method and Theory, 28*(1), 52–76.

Conwell, D. (1987). On ostrich eggs and Libyans: Traces of a Bronze Age people from Bates' Island, Egypt. *Expedition, 29*(3), 25–34.

Cooper, C. H. V. (2015). Spatial localization of closeness and betweenness measures: A self-contradictory but useful form of network analysis. *International Journal of Geographical Information Science, 29*(8), 1293–1309. https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1018834

Cooper, C. H. V., & Chiaradia, A. J. (2015). sDNA: How and why we reinvented spatial network analysis for health, economics and active modes of transport. En N. Malleson (Ed.), *GISRUK 2015 Proceedings* (pp. 122–127). Leeds, UK: GIS Research UK (GISRUK).

Cooper, C. H. V., & Chiaradia, A. J. F. (2020). sDNA: 3-d spatial network analysis for GIS, CAD, Command Line & Python. *SoftwareX, 12*, 100525. https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100525

Cooper, J. (2022). Beyond the Nile: Long-term patterns in nomad-state interactions across Northeast Africa. *Mare Nostrum, 13*(1), 37–86.

Cooper, J. (2022). Children of the desert: The indigenes of the Eastern Desert in the Pharaonic period and the longue durée of desert nomadism. En H. Cuvigny (Ed.), *Blemmyes: New documents and new perspectives* (pp. 5–41). Institut français d'archéologie orientale.

Corlett, R. T. (2011). Trouble with the gray literature. *Biotropica, 43*(1), 3–5. https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2010.00714.x

Costanza, R., Graumlich, L. J., & Steffen, W. (Eds.). (2007). *Sustainability or collapse? An integrated history and future of people on Earth*. MIT Press.

Crawford, K. A., & Vella, M. A. (2022). Cyprus dataset: Settlements from 11000 BCE to 1878 CE. *Journal of Open Archaeology Data, 10*(0), 7. https://doi.org/10.5334/joad.96

Crellin, R., & Harris, O. J. T. (2021). What difference does posthumanism make? *Cambridge Archaeological Journal, 31*(3), 469–475. https://doi.org/10.1017/S0959774321000159

Crema, E. R. (2015). Time and probabilistic reasoning in settlement analysis. En J. A. Barceló & I. Bogdanovic (Eds.), *Mathematics and archaeology* (pp. 314–334). Boca Raton, FL: CRC Press.

Crema, E. R., Bevan, A., & Lake, M. (2010). A probabilistic framework for assessing spatio-temporal point patterns in the archaeological record. *Journal of Archaeological Science, 37*(5), 1118-1130. https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.12.012

Criado-Boado, F. (1988). Arqueología del paisaje y espacio megalítico en Galicia. *Arqueología Espacial: Arqueología del Paisaje, 12*, 61–119.

Criado-Boado, F. (2017). A paisaxe como enxeñería inversa da materia e a memoria. En Ma. García Miraz (Ed.), *Paisaxe e patrimonio: Un percorrido polo territorio a través do arquivo de Galicia* (pp. 147–157). Secretaría Xeral de Cultura.

Criado-Boado, F., & Santos, M. (1998). Espacios simbólicos. *Arqueología Espacial: Arqueología del Paisaje*, 19-20, 503-506.

Cribb, R. (1991). *Nomads in Archaeology*. Cambridge University Press.

Cross, I., & Watson, A. (2006). Acoustics and the human experience of socially-organized sound. In C. Scarre & G. Lawson (Eds.), *Archaeoacoustics* (pp. 107-117). Cambridge: McDonald Institute Monographs.

Crossick, G. (2016). Monographs and open access. *Insights, the UKSG Journal, 29*, 14–19. https://doi.org/10.1629/uksg.280

Crumley, C. L. (1994). Historical ecology: A multidimensional ecological orientation. In C. L. Crumley (Ed.), *Historical ecology. Cultural knowledge and changing landscapes* (pp. 1-16). Santa Fe, New Mexico, USA: School of American Research Advanced Press.

Crumley, C. L. (1995). Heterarchy and the analysis of complex societies. *Archaeological Papers of the American Anthropological Association*, 6(1), 1-5.

Crumley, C. L. (2005). Remember how to organize: Heterarchy across disciplines. In C. S. Beekman & W. W. Baden (Eds.), *Application of nonlinear systems theory to archaeology: Nonlinear models for archaeology and anthropology continuing the revolution* (pp. 35-50). Farnham, Surrey, and Burlington, USA: Ashgate Publishing Company.

Crumley, C. L. (2017). Historical ecology and the study of landscape. *Landscape Research*, 42, 65-73.

Crumley, C. L. (2019). Afterword: Integrating time and space in dynamic systems. In C. Ray & M. Fernández-Götz (Eds.), *Historical ecologies, heterarchies and transtemporal landscapes* (pp. 287-297). London and New York: Routledge.

Crumley, C. L. (2021). Historical ecology: A robust bridge between archaeology and ecology. *Sustainability, 13*(15), 8210. https://doi.org/10.3390/su13158210

Crumley, C. L., Kolen, J., Kleijn, M., & Manen, N. (2017). Studying long-term changes in cultural landscapes: Outlines of a research framework and protocol. *Landscape Research*, 1-11.

Cummings, V., & Johnston, R. (2007). *Prehistoric Journeys*. Oxbow Books.

Cunliffe, B. (1990). Publishing in the city. *Antiquity, 64*(244), 667–671. https://doi.org/10.1017/S0003598X00078595

Cunningham, T., & Driessen, J. (2004). Site by site: Combining survey and excavation data to chart patterns of socio-political change in Bronze Age Crete. In S. E. Alcock & J. F. Cherry (Eds.), *Side-by-side survey: Comparative regional studies in the Mediterranean world* (pp. 101–113). Oxbow Books.

CyberSW. (s.f.). Exploring the pre-Hispanic archaeological record of the US Southwest and Northwest Mexico. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://cybersw.org/

D'Agostino, A., & Orsi, V. (2015). The archaeological survey: Methods and materials. En *Proceedings of the 9th International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East* (pp. 317-333). Studia Asiana, Vol. 10.

Daems, D. (2021). Social complexity and complex systems in archaeology. Routledge.

Daems, D., & Kafetzaki, D. (2025). Unravelling the threads of connectivity: A mutual information approach to tracing material networks in the Late Hellenistic and Early Roman Mediterranean. *Journal of Archaeological Science, 173*, 106121.

Danaos Deep-Water Survey. (2008). Reconstructing the ancient maritime route between Crete and Egypt. Recuperado el 01 de junio de 2024, de https://nauticalarch.org/projects/danaos-deep-water-survey/

Darvill, T. (2015). Afterword: Dances beneath a diamond sky. In F. Silva & N. Campion (Eds.), *Skyscapes: The role and importance of the sky in archaeology* (pp. 140-148). Oxford: Oxbow Books.

David, B., & Thomas, J. (2016). Landscape archaeology: Introduction. In B. David & J. Thomas (Eds.), *Handbook of landscape archaeology* (pp. 27-44). New York and London: Routledge.

Davis, D. S. (2020). Defining what we study: The contribution of machine automation in archaeological research. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 18*, e00152. https://doi.org/10.1016/j.daach.2020.e00152

Davies, W. V., & Schofield, L. (Eds.). (1995). *Egypt, the Aegean and the Levant: Interconnections in the Second Millennium BC*. British Museum Press.

Day, P. M., Quinn, P. S., Rutter, J. B., & Kilikoglou, V. (2011). A world of goods: Transport jars and commodity exchange at the Late Bronze Age harbor of Kommos, Crete. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens, 80*(4), 511–558.

De Haas, T. C. A. (2012). Beyond dots on the map: Intensive survey data and the interpretation of small sites and off-site distributions. En P. A. J. Attema & G. Schörner (Eds.), *Comparative issues in the archaeology of the Roman rural landscape* (pp. 55-79). Portsmouth, RI: Journal of Roman Archaeology Supplementary Series.

De Soto, P. (2019). Network analysis to model and analyse Roman transport and mobility. In P. Verhagen, J. Joyce, & M. R. Groenhuijzen (Eds.), *Finding the limits of the limes: Modelling demography, economy and transport on the edge of the Roman Empire* (pp. 271-289). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04576-0_13

De Soto, P., & Carreras, C. (2021). The role of politics in the historical transport networks of the Iberian Peninsula and the Pyrenees from Roman times to the nineteenth century. *Social Science History, 45*(2), 233-260. https://doi.org/10.1017/ssh.2021.12.

Déderix, S. (2016). Traveling across archaeological landscapes: The contribution of hierarchical communication networks. In S. Campana, R. Scopigno, G. Carpentiero, & M. Cirillo (Eds.), *CAA2015. Keep the revolution going. Proceedings of the 43rd computer applications and quantitative methods in archaeology annual conference* (Vol. 1, pp. 250-256). Archaeopress.

Dehecq, A., Gardner, A. S., Alexandrov, O., McMichael, S., Hugonnet, R., Shean, D., & Marty, M. (2020). Automated processing of declassified KH-9 Hexagon satellite images for global elevation change analysis since the 1970s. *Frontiers in Earth Science, 8*, 566802. https://doi.org/10.3389/feart.2020.566802

Deleuze, G., & Guattari, F. (1987). *A thousand plateaus: Capitalism and schizophrenia* (B. Massumi, Trans.). Minneapolis: University of Minnesota Press.

Desert Networks. (s.f.). Desert networks. Recuperado el 01 de junio de 2024, de https://desertnetworks.huma-num.fr

DeSilvey, C. (2006). Observed decay: Telling stories with mutable things. *Journal of Material Culture, 11*(3), 318-338.

DeSilvey, C. (2007). Salvage memory: Constellating material histories on a hardscrabble homestead. *Cultural Geographies, 14*(3), 401-424.

Dicks, T. R. B. (1972). Network analysis and historical geography. *Area, 4*(1), 4–9.

Dickinson, O. (2006). *The Aegean from Bronze Age to Iron Age: Continuity and Change Between the Twelfth and Eighth Centuries BC*. Routledge.

Díaz De Liaño, G., & Fernandez-Götz, M. (2021). Posthumanism, new humanism, and beyond. *Cambridge Archaeological Journal*, 1–7.

Díaz Rodríguez, M. (2020). *Tecnologías geoespaciales aplicadas al estudio del Paleolítico en el Noroeste Peninsular* (Tesis doctoral). Universidade de Santiago de Compostela. http://hdl.handle.net/10347/23955

Di Lernia, S., & Gallinaro, M. (2014). Libya before and after the conflict: What future for its cultural heritage? En A. Castillo (Ed.), *Archaeological Dimension of World Heritage: From Prevention to Social Implications* (pp. 73–87). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0283-5_6

Directorate-General for Mobility and Transport. (s.f.). Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://road-safety.transport.ec.europa.eu/index_en

Dominey-Howes, D., Dawson, A., & Smith, D. (1999). Late Holocene coastal tectonics at Falasarna, western Crete: A sedimentary study. *Geological Society, London, Special Publications, 146*(1), 343–352. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.146.01.20

Donnellan, L. (2020). *Archaeological networks and social interaction*. Routledge.

Doran, J. E., & Hodson, F. R. (1975). *Mathematics and computing in archaeology*. Harvard University Press.

Drennan, R. D. (2009). *Statistics for archaeology: A commonsense approach*. Springer.

Driessen, J. (Ed.). (2022). *Excavations at Sissi V: Preliminary Report on the 2017-2019 Campaigns* (Vols. 1 & 2). Presses universitaires de Louvain. ISBN 978-2-39061-198-1.

Duda, R. O., & Hart, P. E. (1973). *Pattern classification and scene analysis*. Wiley.

Dunnell, R. (1971). *Systematics in prehistory*. Free Press.

Dunnell, R., & Dancey, W. S. (1983). The siteless survey: A regional scale data collection strategy. En M. Schiffer (Ed.), *Advances in archaeological method and theories* (Vol. 6, pp. 267–287). Academic Press.

Earl, G., Sly, T., Chrysanthi, A., Murrieta-Flores, P., Papadopoulos, C., Romanowska, I., & Wheatley, D. (Eds.). (2014). *Archaeology in the digital era: Papers from the 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA 2012)*. Amsterdam, Netherlands: Amsterdam University Press.

Ebert, J. I., & Kohler, T. A. (1988). The theoretical basis of predictive modeling and a consideration of appropriate data-collection methods. En W. J. Judge & L. Sebastian (Eds.), *Quantifying the present and predicting the past: Theory, method, and application of archaeological predictive modeling* (pp. 97–171). Denver, CO: U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management Service Center.

Edgerton, W. F., & Wilson, J. A. (1936). *Historical Records of Ramses III: The Texts in Medinet Habu Volumes 1 and 2*. University of Chicago Press.

Egeler, M. (2019). Introduction: 'Landscape', 'myth', and the north-western European perspective. In M. Egeler (Ed.), *Landscape and myth in north-western Europe* (pp. 1-24). Belgium: Brepols.

El-Behaedi, R., & Ghoneim, E. (2018). Flood risk assessment of the Abu Simbel Temple Complex (Egypt) based on high-resolution spaceborne stereo imagery. *Journal of Archaeological Science: Reports, 20*, 458-467.

Ελληνικό Κτηματολόγιο (Catastro griego). (s.f.). Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://gis.ktimanet.gr/

Embabi, N. S. (2018). *Landscapes and Landforms of Egypt: Landforms and Evolution*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65661-8.

Endangered Archaeology in the Middle East and North Africa (EAMENA). (s.f.). *Endangered Archaeology in the Middle East and North Africa*. Recuperado el 01 de junio de 2024, de https://eamena.org/

Ericson, J. E., & Goldstein, R. (1980). Work space: A new approach to the analysis of energy expenditure. *Anthropology UCLA, (Nos. 10–11)*, 21–30.

Eriksson, O., Ekblom, A., Lane, P., Lennartsson, T., & Lindholm, K.-J. (2018). Concepts for integrated research in historical ecology. En C. L. Crumley, T. Lennartsson, & A. Westin (Eds.), *Issues and concepts in historical ecology* (pp. 131-154). Cambridge University Press.

Esri. (2017). *ArcGIS Desktop: Release 10.5*. Environmental Systems Research Institute.

Esri. (s.f). *Land Cover Explorer*. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/

Esri. (s.f.). *Landsat Explorer*. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://livingatlas.arcgis.com/landsatexplorer/

European Environment Agency. (s.f.). *Corine Land Cover*. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover

European Environment Agency. (s.f.). *Datahub Item View*. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/d08852bc-7b5f-4835-a776-08362e2fbf4b

Evans, A. J. (1921–1935). *The Palace of Minos: A comparative account of the successive stages of the early Cretan civilization as illustrated by the discoveries at Knossos* (Vols. 1–4). London, UK: Macmillan.

Evans, N. L. T. (2015). A reassessment of archaeological grey literature: Semantics and paradoxes. *Internet Archaeology, 40*. https://doi.org/10.11141/ia.40.6

Evans, N. L. T., & Moore, R. (2014). Beyond "the preserving machine": Promoting use and reuse of grey literature and grey data. *Archaeological Review from Cambridge, 29*(2), 226–243.

Fabrega-Álvarez, P. (2006). Moving without destination. A GIS-based determination of routes (optimal accumulation model of movement from a given origin). *Archaeological Computing Newsletter, 64*, 7-11.

Fábrega-Álvarez, P. (2016). Un alto en el camino: Notas acerca del uso de SIG en los análisis de movilidad en arqueología. En M. C. Mínguez & E. Capdevilla (Eds.), *Manual de Tecnologías de la Información Geográfica aplicadas a la Arqueología* (pp. 161–182). Comunidad de Madrid.

Fábrega-Álvarez, P., & Parcero-Oubiña, C. (2007). Proposals for an archaeological analysis of pathways and movement. *Archeologia e Calcolatori, 18*, 121–140.

Fairclough, G. (2012). Look the other way: From a branch of archaeology to a root of landscape studies. In S. Kluiving & E. Guttmann-Bond (Eds.), *Landscape archaeology between art and science* (pp. 471-485). Amsterdam: Amsterdam University Press.

Faniel, I., Kansa, E., Witcher Kansa, S., Barrera-Gomez, J., & Yakel, E. (2013). The challenges of digging data: A study of context in archaeological data reuse. In J. S. Downie & R. McDonald (Eds.), *Proceedings of the 13th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries* (pp. 295–304). ACM.

Fauconnier, G., & Turner, M. (2002). *The way we think: Conceptual blending and the mind's hidden complexities.* Basic Books.

Fecher, B., & Friesike, S. (2014). Open science: One term, five schools of thought. In S. Bartling & S. Friesike (Eds.), *Opening science: The evolving guide on how the internet is changing research, collaboration and scholarly publishing* (pp. 17–47). Springer.

Fellinger, R., & Philpot, L. (Eds.). (2014). *The archive issue.* Archaeological Review from Cambridge, *29*(2).

Feinman, G. (2015). Settlement and landscape archaeology. In J. Wright (Ed.), *International encyclopedia of the social & behavioral sciences* (pp. 654-658). Oxford, England: Elsevier.

Feinman, G. M. (2012). The emergence of social complexity: Why more than population size matters. En D. M. Carballo (Ed.), *Cooperation & collective action: Archaeological perspectives* (pp. 35-56). University Press of Colorado.

Ferdani, D., Demetrescu, E., Cavalieri, M., Pace, G., & Lenzi, S. (2019). 3D Modelling and Visualization in Field Archaeology: From Survey to Interpretation of the Past Using Digital Technologies. *GROMA Documenting Archaeology, 4*, 21.

Fernández Fernández, J., Alonso González, P., & Navajas Corral, Ó. (2015). La Ponte-Ecomuséu: una herramienta de desarrollo rural basada en la socialización del patrimonio cultural. En *Actas del Congreso SOPA, Congreso Internacional sobre Educación y Socialización del Patrimonio en el Medio Rural. La Descomunal. Revista Iberoamericana de Patrimonio y Comunidad, 1*(2), 117-130.

Fernández Martínez, V. (1989). La prospección arqueológica: planteamientos, ayudas y técnicas. En V. Fernández Martínez (Ed.), *Teoría y método de la Arqueología* (pp. 54-67). Madrid: Síntesis.

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (s.f.). WorldClim: Global Climate Data. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://www.worldclim.org/

Fitzhugh, B., Butler, V. L., Bovy, K. M., & Etnier, M. A. (2018). Human ecodynamics: A perspective for the study of long-term change in socioecological systems. *Journal of Archaeological Science Reports, 23*, 1077-1094.

Fleming, A. (2012). The future of landscape archaeology. In S. Kluiving & E. Guttmann-Bond (Eds.), *Landscape archaeology between art and science* (pp. 461-471). Amsterdam: Amsterdam University Press.

Fletcher, M., & Lock, G. (1991). *Digging numbers: Elementary statistics for archaeologists.* Oxford, UK: Oxford University Press.

Foley, R. (1981). Off-site archaeology: An alternative approach for the short-sited. En I. Hodder, G. Isaac, & N. Hammond (Eds.), *Pattern of the past: Studies in honour of David Clarke.* Cambridge: Cambridge University Press.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). Global Agro-Ecological Zones (GAEZ). Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://gaez.fao.org/

Forte, M. (2016). Cyber Archaeology: 3D Sensing and Digital Embodiment. En M. Forte & S. Campana (Eds.), *Digital methods and remote sensing in archaeology. Quantitative methods in the humanities and social sciences.* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40658-9_12

Forte, M., & Campana, S (Eds.). (2016). *Digital methods and remote sensing in archaeology: Archaeology in the age of sensing*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40658-9

Foucault, M. (1984). Des espaces autres. En D. Defert & F. Ewald (Eds.), *Dits et écrits* (Vol. 4, pp. 752–762). Gallimard.

Foucault, M. (1986). Of other spaces (J. Miskowiec, Trans.). *Diacritics, 16*(1), 22–27.

Foxhall, L., Herring, E., & Whitehouse, R. (2015). *Ethnoarchaeology and the structure of material culture*. Cambridge University Press.

Francis, J. E., & Kouremenos, A. (Eds.). (2016). *Roman Crete: New Perspectives*. Oxbow Books.

Franzese, R. J., Hays, J. C., & Kachi, A. (2012). Modeling history dependence in network-behavior coevolution. *Political Analysis, 20*(2), 175–190. https://doi.org/10.1093/pan/mpr049

Freeberg, T. M., Dunbar, R. I. M., & Ord, T. J. (2012). Social complexity as a proximate and ultimate factor in communicative complexity. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 367*(1597), 1785–1801. https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0213

Freedman, D. A. (2009). *Statistical models: Theory and practice*. Cambridge University Press.

Freedman, L. C. (1979). Centrality in social networks: I. Conceptual clarification. *Social Networks, 1*, 215–239. https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7

Frigg, R., & Nguyen, J. (2017). Models and representation. En L. Magnani & T. Bertolotti (Eds.), *Springer handbook of model-based science* (pp. 49–102). Springer Handbooks.

Gaignerot-Driessen, F. (2016). *De l'occupation postpalatiale à la cité-état grecque: Le cas du Mirambello (Crète)*. Peeters.

Gal, D., Saaroni, H., & Cvikel, D. (2021a). A new method for examining maritime mobility of direct crossings with contrary prevailing winds in the Mediterranean during antiquity. *Journal of Archaeological Science, 129*, 105369. https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105369

Gal, D., Saaroni, H., & Cvikel, D. (2021b). Measuring potential coastal sailing mobility with the loose-footed square sail. *Journal of Archaeological Science, 136*, 105500. https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105500

Gal, D., Saaroni, H., & Cvikel, D. (2022). Mappings of potential sailing mobility in the Mediterranean during antiquity: Research Data. *Mendeley Data, V1*. https://doi.org/10.17632/hzbg2wyjxb.1

Galeazzi, F., & Richards-Rissetto, H. (2018). Editorial introduction: Web-based archaeology and collaborative research. *Journal of Field Archaeology, 43*(Suppl. 1), 1–8. https://doi.org/10.1080/00934690.2018.1512701

Gamble, C. (2001). *Archaeology: The basics*. Routledge.

Garagnani, S., & Gaucci, A. (2020). The ArchaeoBIM method and the role of digital models in archaeology. *Archeologia e Calcolatori, 31*(2), 181–188.

García Sanjuán, L. (2004). La prospección arqueológica de superficie y los SIG. En J. C. Martín de la Cruz (Ed.), *I Encuentro Internacional de Informática Aplicada a la Investigación y la Gestión Arqueológicas* (pp. 185–209). Universidad de Córdoba.

García Sanjuán, L. (2005). *Introducción al reconocimiento y análisis arqueológico del territorio*. Ariel.

García, J. C. M. (2014). Invaders or just herders? Libyans in Egypt in the third and second millennia BCE. *World Archaeology, 46*(4), 610–623.

García-Álvarez, D., Van Delden, H., Olmedo, M. T. C., & Paegelow, M. (2019). Uncertainty challenge in geospatial analysis: An approximation from the land use cover change modelling perspective. En M. Paegelow, D. Camacho Olmedo, & H. W. Loidl (Eds.), *Geospatial challenges in the 21st century* (pp. 289–305). Springer.

García-Contreras Ruiz, G. (2019). La interpretación de los paisajes históricos como recurso en la arqueología del paisaje. *Revista de Arqueología del Paisaje, 64*, 191–230.

Gasperini, V. (2017). Goods from the wine-dark sea: Typology of imports excavated at Zawiyet Umm el-Rakham. En H. Franzmeier, Th. Rehren, & R. Schulz (Eds.), *Mit archäologischen Schichten Geschichte schreiben. Festschrift für Edgar B. Pusch zum 70. Geburtstag* (pp. 119–136). Gerstenberg.

Gärdenfors, P., & Stephens, A. (2017). Induction and knowledge-what. *European Journal for Philosophy of Science, 8*(3), 471–491. https://doi.org/10.1007/s13194-017-0196-y

German Occupation Database. (s.f.). Recuperado el 8 de agosto de 2024, de http://www.eie.gr/nhrf/institutes/ihr/projects/GermanOccupationDatabase/GermanOccupationDatabase_en.html

Gheorghiade, P. (2020). *A network approach to cultural interaction and maritime connectivity on Crete during the Late Bronze Age - Late Minoan II – IIIB2* (Tesis doctoral). University of Toronto, Department of Art History.

Gheorghiade, P., & Spencer, C. (2024). Modelling the cost of the wind: A preliminary reassessment of networks of mobility in the Late Bronze Age Mediterranean. *Journal of Computer Applications in Archaeology, 7*(1), 36–53. https://doi.org/10.5334/jcaa.119

Ghilardi, M., Revelles, J., Glais, A., Theodorakopoulou, K., Theodoropoulou, T., Lespez, L., Longo, F., Rossi, A., Bellier, O., Benedetti, L., & Fleury, J. (2019). Reconstructing human-environment interactions in the western Messara Plain (Phaistos, Crete, Greece) from the emergence of city states to Byzantine times. *Journal of Archaeological Science: Reports, 26*, 101909. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.101909

Giacomorra, M. (2006). *I pastori delle Madonie: Ambiente, tecniche, società*. Palermo: Fondazione Ignazio Buttitta.

Giardino, M. J. (2011). A history of NASA remote sensing contributions to archaeology. *Journal of Archaeological Science, 38*(9), 2003-2009.

Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances. En R. Shaw & J. Bransford (Eds.), *Perceiving, acting, and knowing: Toward an ecological psychology* (pp. 67–82). Lawrence Erlbaum.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Houghton Mifflin.

Gibson, J. J. (2006). *Embodiment and cognitive science*. Cambridge: Cambridge University Press.

Gibson, S. (2007). Beneath the surface: Archaeological interpretations of pathways and mobility. En G. Lock & B. Molyneaux (Eds.), *Conversations in Archaeology* (pp. 112–129). Blackwell Publishing.

Gil, J. (2017). Street network analysis "edge effects": Examining the sensitivity of centrality measures to boundary conditions. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 44*(5), 819–836. https://doi.org/10.1177/0265813516650678

Gillings, M., Hacıgüzeller, P., & Lock, G. (Eds.). (2020). *Archaeological spatial analysis: A methodological guide*. London, UK: Routledge.

Goudie, A. (2008). *Wheels across the desert: Exploration of the Libyan Desert by motorcar 1916–1942*. London: Silphium Press.

Goethe, J. W. von. (2016). *Phenomenology of nature* (J. Smith, Trans.). (Original work published 1808). Publisher.

González-Pérez, C. (2018). *Information Modelling for Archaeology and Anthropology: Software Engineering Principles for Cultural Heritage*. Springer.

González-Pérez, C., Pereira-Fariña, M., Martín-Rodilla, P., & Tobalina, L. (2023). Dealing with vagueness in archaeological discourses. En C. González-Pérez, M. Pereira-Fariña, P. Martín-Rodilla, & L. Tobalina (Eds.), *Discourse and argumentation in archaeology: Conceptual and computational approaches* (pp. 157-173). Springer.

González-Ruibal, A. (2021). Subaltern assemblages: The archaeology of marginal places and identities. *World Archaeology, 53*(3), 369–383.

Goodchild, M. F. (2007). Beyond metadata: Towards user-centric description of data quality. En *Proceedings of the 2007 International Symposium on Spatial Data Quality* (pp. 13-15). Enschede, Netherlands: ISPRS.

Goodchild, M. F., Fu, P., & Rich, P. M. (2007). Sharing geographic information: An assessment of the geospatial one-stop. *Annals of the American Association of Geographers, 97*(2), 250-266.

Google Earth. (s.f.). Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://earth.google.com/

Goudie, A. (2013). *Desert landscapes of the world with Google Earth*. Springer.

Graham, S. (2006). Networks, agent-based models and the Antonine itineraries: Implications for Roman archaeology. En *Proceedings of the 37th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (pp. 48). Oxford: Archaeopress.

Graham, S. (2009). The space between: The geography of social networks in the Tiber valley. En F. Coarelli & H. Patterson (Eds.), *Mercator Placidissimus: The Tiber Valley in Antiquity. New research in the upper and middle river valley* (Vol. 1, pp. 671-686). Edizioni Quasar.

Grajetzki, W., & Quirke, S. (2000). *Digital Egypt for Universities*. University College London. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://www.ucl.ac.uk/digital-egypt

Grau Mira, I. (2003). Settlement dynamics and social organization in Eastern Iberia during the Iron Age (eighth-second centuries BC). *Oxford Journal of Archaeology, 22*(3), 261-279.

Grau Mira, I. (2004). La construcción del paisaje ibérico: Aproximación SIG al territorio protohistórico de la Marina Alta. *SAGVNTVM (P.L.A.V.), 36*, 61-75.

Grau Mira, I. (2005). Romanization in Eastern Spain: A GIS approach to late Iberian Iron Age landscape. En J. F. Berger, F. Bertoncello, F. Braemer, D. Gourguen, & M. Gazenbeek (Eds.), *Temps et espaces de l'homme en société: Analyses et modèles spatiaux en archéologie. XXVIe Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes* (pp. 325-334). Éditions APDCA.

Grau Mira, I. (2006). *La aplicación de los SIG en la arqueología del paisaje*. Alicante: Universidad de Alicante.

Grau Mira, I. (2011). Movimiento, circulación y caminos en el paisaje digital. *Revista Arqueológica Digital, 5*(3), 117–136.

Green, K. (2014). Use of a digital archive: The Archaeology Data Service. *Archaeological Review from Cambridge: The Archive Issue, 29*(2), 212–226.

Griffith, D. A., *&* Amrhein, C. G. (1983). An evaluation of correction techniques for boundary effects in spatial statistical analysis: Traditional methods. *Geographical Analysis, 15*(4), 352–360. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1985.tb00828.x

Grosman, L. (2016). Reaching the point of no return: The computational revolution in archaeology. *Annual Review of Anthropology, 45*, 129-145.

Grossner, K., *&* Mostern, R. (2021). Linked places in world historical gazetteer. En *Proceedings of the 5th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Geospatial Humanities (GeoHumanities '21)* (pp. 40–43). Association for Computing Machinery.

Grove, A. T., Moody, J., *&* Rackham, O. (1991). Crete and the South Aegean Islands: Effects of changing climate on the environment. *Final report submitted for the MEDALUS project, contract number EV4C-0073-UK*. Geography Department, University of Cambridge.

Grundon, I. (2007). *The Rash Adventurer: A Life of John Pendlebury*. Ditley Press.

Grunewald, S., *&* Mostern, R. (2023). Working with named places: How and why to build a gazetteer. *Programming Historian*.

Gunnell, T. (2019). Spaces, places, and liminality: Marking out and meeting the dead and the supernatural in old Nordic landscapes. En M. Egeler (Ed.), *Landscape and myth in north-western Europe* (pp. 25-44). Belgium: Brepols.

Gupta, N., Martindale, A., Supernant, K., *&* Elvidge, M. (2023). The CARE principles and the reuse, sharing, and curation of Indigenous data in Canadian archaeology. *Advances in Archaeological Practice, 11*(1), 76–89. https://doi.org/10.1017/aap.2022.33

Güimil-Fariña, A., *&* Parcero-Oubiña, C. (2015). 'Dotting the joins': A non-reconstructive use of Least Cost Paths to approach ancient roads. The case of the Roman roads in the NW Iberian Peninsula. *Journal of Archaeological Science, 54*, 31–44. https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.11.030

Haas, T. (2012). Beyond dots on the map: Intensive survey data and the interpretation of small sites and off-site distributions. En P. Attema *&* G. Schörner (Eds.), *Comparative issues in the archaeology of the Roman rural landscape: Site classification between survey, excavation and historical categories* (JRA Supplementary Series, Vol. 88, pp. 55–79). Portsmouth: Journal of Roman Archaeology.

Habachi, L. (1980). The military posts of Ramesses II on the coastal road and the western part of the Delta. *Bulletin de l'Institut Français d'Archéologie Orientale, 80*, 13–30.

Haggis, D. C. (1992). *The Kavousi-Thriphti Survey: An analysis of settlement patterns in an area of eastern Crete in the Bronze Age and Early Iron Age* (Doctoral dissertation). University of Minnesota.

Hahsler, M., Grün, B., *&* Hornik, K. (2005). Arules: A computational environment for mining association rules and frequent item sets. *Journal of Statistical Software, 14*(15), 1–25. https://doi.org/10.18637/jss.v014.i15

Haining, R. (2003). *Spatial data analysis: Theory and practice*. Cambridge University Press.

Hall, H. R. (1913). *The ancient history of the Near East from the earliest times to the Battle of Salamis*. Methuen.

Halperin, C. T. (2017). Anthropological archaeology in 2016: Cooperation and collaborations in archaeological research and practice. *American Anthropologist, 119*(2), 284–297. https://doi.org/10.1111/aman.12860

Hambrecht, G., Anderung, C., Brewington, S., Dugmore, A., Edvardsson, R., Feeley, F., Gibbons, K., Harrison, R., Hicks, M., Jackson, R., Ólafsdóttir, G. Á., Rockman, M., Smiarowski, K., Streeter, R., Szabo, V., *&* McGovern, T. H. (2020). Archaeological sites as distributed long-term observing networks of the past (DONOP). *Quaternary International, 549*, 218–226. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.04.016

Hamerow, H. (2018). Early medieval 'places and spaces': Breaking down boundaries in British archaeology. En J. A. Quirós Castillo (Ed.), *Treinta años de arqueología medieval en España* (pp. 35–48). Archaeopress.

Hamilakis, Y. (2017). Archaeology and assemblage theory. *Annual Review of Anthropology, 46*(1), 89–105.

Hammer, E., FitzPatrick, M., *&* Ur, J. (2022). Succeeding CORONA: Declassified HEXAGON intelligence imagery for archaeological and historical research. *Antiquity, 96*(387), 679-695. https://doi.org/10.15184/aqy.2022.22

Hardman, C., *&* Richards, J. D. (2003). OASIS dealing with the digital revolution. In M. Doerr *&* A. Sarris (Eds.), *Proceedings of the 30th CAA Conference, Heraklion, Crete, April 2002: The digital heritage of archaeology: Computer applications and quantitative methods in archaeology*. Hellenic Ministry of Culture.

Hariri, R. H., Fredericks, E. M., *&* Bowers, K. M. (2019). Uncertainty in big data analytics: Survey, opportunities, and challenges. *Journal of Big Data, 6*(44). https://doi.org/10.1186/s40537-019-0206-3

Harris, T. (2000). Aplicación de tecnologías espaciales. En G. Lock (Ed.), *Beyond the map: Archaeology and spatial technologies* (pp. 92–110). IOS Press.

Harrison, R. (2015). Beyond 'natural' and 'cultural' heritage: Toward an ontological politics of heritage in the age of Anthropocene. *Heritage & Society, 8,* 24–42.

Harrison, R., *&* Maher, R. H. (2014). Humans - A force of nature. In R. Harrison *&* R. H. Maher (Eds.), *Human ecodynamics in the North Atlantic: A collaborative model of humans and nature through space and time* (pp. 1–21). Maryland: Lexington Books.

Harvey, D. (1996). *Justice, nature and the geography of difference.* Oxford: Blackwell.

Hassanein Bey, A. M. (1924). *Crossing the untraversed Libyan Desert*. *National Geographic Magazine, 46*(3), 49–88.

Hayden, B. J., Moody, J. A., *&* Rackham, O. (1992). The Vrokastro Survey Project, 1986–1989: Research design and preliminary results. *Hesperia, 61*(3), 293–353.

Hayles, N. K. (2016). *Unthought: The power of the cognitive nonconscious.* Chicago: University of Chicago Press.

Headland, T. N., Pike, K. L., *&* Harris, M. (1990). *Emics and etics: The insider/outsider debate.* Newbury Park, CA: Sage Publications.

Heras-Escribano, M., *&* de Pinedo-García, M. (2017). Affordances and landscapes: Overcoming the nature–culture dichotomy through niche construction theory. *Frontiers in Psychology, 8,* 2294. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02294

Herb, M., *&* Derchain, Ph. (2008). The 'landscapes' of ancient Egypt: Intellectual reactions to the environment of the Lower Nile Valley. In M. Bollig *&* O. Bubenzer (Eds.), *Studies in human ecology. African landscapes. Interdisciplinary approaches* (pp. 155–174). Springer.

Herdon, K. E., Griffin, R., Schroeder, W., Murtha, T., Golden, C., Contreras, D. A., Cherrington, E., Wang, L., Bazarsky, A., Van Kollias, G., *&* Alcover Firpi, O. (2023). Google Earth Engine for archaeologists: An updated look at the platform. *Journal of Archaeological Science: Reports, 50,* 104094.

Herrera Malatesta, E. N. (2018). *Una isla, dos mundos: Estudio arqueológico sobre el paisaje indígena de Haití y su transformación al paisaje colonial de La Española (1200–1550)* (Tesis doctoral). Leiden University, Leiden.

Herzog, I. (2013). The potential and limits of optimal path analysis. En A. Bevan *&* M. Lake (Eds.), *Computational approaches to archaeological spaces* (pp. 179–211). Left Coast Press.

Herzog, I. (2014). A review of case studies in archaeological least cost analysis. *Archeologia e Calcolatori, 25,* 223–239. https://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF25/12_Herzog.pdf

Herzog, I. (2020). Spatial analysis based on cost functions. En *Archaeological Spatial Analysis* (1st ed., pp. 26). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781351243858

Herzog, I. (2021). Issues in replication and stability of least-cost path calculations. *Studies in Digital Heritage, 5*(2), 131–155. https://doi.org/10.14434/sdh.v5i2.33796

Hester, T. R., Shafer, H. J., & Feder, K. L. (2009). *Field methods in archaeology* (7th ed.). Left Coast Press

Hetherington, K. (2004). Secondhandedness: Consumption, disposal, and absent presence. *Environment and Planning D: Society and Space, 22*(1), 157–173.

Hibbert, C. (1982). *Africa explored: Europeans in the dark continent, 1769-1889*. London: Hamish Hamilton.

Hill, J. B., Peeples, M. A., Huntley, D. L., & Carmack, H. J. (2015). Spatializing social network analysis in the late precontact U.S. Southwest. *Advances in Archaeological Practice, 3*(1), 63–77. https://doi.org/10.7183/2326-3768.3.1.63

Hinojosa-Baliño, I. (2022). *Urban fluctuations in the north-central region of the Nile Delta: 4000 years of river and urban development in Egypt* (Tesis doctoral). Durham University

Hobson, M. S. (2019). EAMENA training in the use of satellite remote sensing and digital technologies in heritage management: Libya and Tunisia workshops 2017–2019. *Libyan Studies, 50,* 63–71

Hodder, I. (1982). *Symbols in action: Ethnoarchaeological studies of material culture.* Cambridge University Press

Hodder, I. (1987). La arqueología en la era postmoderna. *Trabajos de Prehistoria, 44,* 11–26

Hodder, I. (1988). From space to place: Current trends in spatial archaeology. *Arqueología Espacial: Arqueología del Paisaje, 12*, 9–16

Hodder, I. (1999). *The archaeological process: An introduction.* Blackwell

Hodder, I., & Orton, C. (1976). *Spatial Analysis in Archaeology.* Cambridge University Press

Hodson, F. R., Kendall, D. G., & Tautu, P. (Eds.). (1971). *Mathematics in the archaeological and historical sciences.* Edinburgh, UK: Edinburgh University Press

Hoffman, G. L. (1997). *Imports and Immigrants: Near Eastern Contacts with Iron Age Crete.* University of Michigan Press

Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics, 4*, 1–23

Hood, S., & Smyth, D. (1981). *Archaeological Survey of the Knossos Area* (2nd ed., rev. and expanded). British School at Athens

Horden, P., & Purcell, N. (2000). *The Corrupting Sea: A Study of Mediterranean History.* Blackwell Publishers.

Hornemann, F. (1802). *Travels from Cairo to Mourzouk*. London: African Association.

Hounsell, D. D. U. (2002). *The occupation of Marmarica in the Late Bronze Age: An archaeological and ethnographical study* (Tesis doctoral). Universidad de Liverpool

Howey, M. (2007). Using multi-criteria cost surface analysis to explore past regional landscapes. *Journal of Archaeological Method and Theory, 14*(4), 311–334. https://doi.org/10.1016/j.jas.2007.01.002

Hubbard, D. W. (2010). *How to measure anything: Finding the value of intangibles in business* (2ª ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons

Huggett, J. (2012). Lost in information? Ways of knowing and modes of representation in e-archaeology. *World Archaeology, 44,* 538–552

Huggett, J. (2014). Disciplinary issues: Challenging the research and practice of computer applications in archaeology. En G. Earl, T. Sly, & P. Verhagen (Eds.), *Archaeology in the digital era: Papers from the 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Southampton, 26–29 March 2012* (pp. 13–24). Amsterdam: Amsterdam University Press

Huggett, J. (2015a). A manifesto for an introspective digital archaeology. *Open Archaeology, 1*(1), 86-95. https://doi.org/10.1515/opar-2015-0002

Huggett, J. (2015b). Digital haystacks: Open data and the transformation of archaeological knowledge. En A. T. Wilson & B. Edwards (Eds.), *Open-source archaeology: Ethics and practice* (pp. 6–29). De Gruyter Open Poland

Huggett, J. (2017). The apparatus of digital archaeology. *Internet Archaeology, 44*. https://doi.org/10.11141/ia.44.7

Huggett, J. (2018). Reuse, remix, recycle: Repurposing archaeological digital data. *Advances in Archaeological Practice, 6*, 93–104. https://doi.org/10.1017/aap.2018.1

Huggett, J. (2020). Is big digital data different? Towards a new archaeological paradigm. *Journal of Field Archaeology, 45,* 8–17.

Huggett, J. (2022). Data legacies, epistemic anxieties, and digital imaginaries in archaeology. *Digital, 2*(2), 267–295.

Hulin, L. (1999). 'Marmaric' wares: Some preliminary remarks. *Libyan Studies, 30,* 11–16.

Hulin, L. (2001). Marmaric wares: New Kingdom and later examples. *Libyan Studies, 32,* 67–78.

Hulin, L. (2008). Western Marmarica Coastal Survey 2008: A preliminary report. *Libyan Studies, 39,* 299–314.

Hulin, L. (2011). Pragmatic technology: Issues in the interpretation of Libyan material culture. En K. Duistermaat & I. Regulski (Eds.), *Intercultural contacts in the ancient Mediterranean: Proceedings of the International Conference at the Netherlands-Flemish Institute in Cairo, 25th–29th October 2008* (pp. 101–114). Leuven: Peeters.

Hulin, L. (2012). The Western Marmarica Coastal Survey, Libya. *Journal of Ancient Egyptian Interconnections, 4*(4), 14–17. https://doi.org/10.2458/azu_jaei_v04i4_hulin

Hulin, L. (2018). Marsa Matruh revisited: Modelling interaction at a Late Bronze Age harbour on the Egyptian coast. En A. Manzo, C. Zazzaro, & D. J. de Falco (Eds.), *Stories of globalisation: The Red Sea and the Persian Gulf from late prehistory to early modernity* (pp. 53–67). Brill.

Hulin, L. (2020). The Libyans. En E. Bloxam & I. Shaw (Eds.), *The Oxford Handbook of Egyptology* (pp. 493–513). Oxford University Press.

Hulin, L., & White, D. (2002). A final summary of the evidence. En D. White (Ed.), *Marsa Matruh II: The objects* (pp. 169–185). INSTAP Academic Press.

Hulin, L., Timby, J., & Mutri, G. (2009). The Western Marmarica Coastal Survey 2009: Preliminary report. *Libyan Studies, 40*, 179–187. https://doi.org/10.1017/S0263718900004568

Hulin, L., Timby, J., Muftah, A. M., & Mutri, G. (2010). Western Marmarica Coastal Survey 2010: Preliminary report. *Libyan Studies, 41,* 155–162.

Hurst Thomas, D. (1975). Nonsite sampling in archaeology: Up the creek without a site? En J. W. Mueller (Ed.), *Sampling in archaeology* (pp. 61–81). University of Arizona Press.

Husserl, E. (2012). *Ideas relativas a una fenomenología pura y una filosofía fenomenológica* (J. Gaos, Trad.). (Original work published 1913). Editorial Trotta.

Højsgaard, S., Zhang, S., Kipnis, V., Midthune, D., Freedman, L. S., & Carroll, R. J. (2012). intake_epis_food(): An R function for fitting a bivariate nonlinear measurement error model to estimate usual and energy intake for episodically consumed foods. *Journal of Statistical Software, 46*, 1–26. https://doi.org/10.18637/jss.v046.i10

Ihm, P. (1978). *Statistik in der Archäologie*. Bonn, Alemania: Habelt.

Iliopoulos, A. (2019). Material engagement theory and its philosophical ties to pragmatism. *Phenomenology and the Cognitive Sciences, 18*(1), 39–63. https://doi.org/10.1007/s11097-018-9596-5

Iliopoulos, A., & Malafouris, L. (2014). *Cognitive archaeology*. En C. Smith (Ed.), *Encyclopedia of global archaeology*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0465-2_256

Ince, G. E., Koukoulis, T., & Smyth, D. (1987). Paliochora: Survey of a Byzantine city on the island of Kythera. Preliminary report. *Annual of the British School at Athens, 82*, 95–106. https://doi.org/10.1017/S0068245400020347

Ingerson, A. E. (1994). Tracking and testing the nature/culture dichotomy in practice. In C. L. Crumley (Ed.), *Historical ecology. Cultural knowledge and changing landscapes* (pp. 43–66). Santa Fe, New Mexico, USA: School of American Research Advanced Press.

Ingold, T. (1992). Culture and the perception of the environment. In E. Croll & D. Parkin (Eds.), *Bush base: forest farm. Culture, environment and development* (pp. 39–56). Routledge.

Ingold, T. (1993). The temporality of the landscape. *World Archaeology, 25*(2), 152–174. https://doi.org/10.1080/00438243.1993.9980235

Ingold, T. (2011). *Being alive: Essays on movement, knowledge and description*. Routledge.

Ingold, T. (2017). Taking taskscape to task. In U. Rajada & P. Mills (Eds.), *Forms of dwelling: 20 years of taskscapes in archaeology* (pp. 16–27). Oxford: Oxbow Books.

Irwin, G. J. (1978). Pots and entrepots: A study of settlement, trade and the development of economic specialization in Papuan prehistory. *World Archaeology, 9*(3), 299–319.

Irwin-Williams, C. (1977). Prehistoric trade models. In T. K. Earle & J. E. Ericson (Eds.), *Exchange systems in prehistory* (pp. 147–170). Academic Press.

Isaksen, L. (2007). Network analysis of transport vectors in Roman Baetica. In J. T. Clark & E. M. Hagemeister (Eds.), *Digital Discovery: Exploring New Frontiers in Human Heritage. Proceedings of the 34th CAA Conference, Fargo, 2006* (pp. 76–87). Archaeolingua.

Isaksen, L. (2008). The application of network analysis to ancient transport geography: A case study of Roman Baetica. *Digital Medievalist, 4*.

Jensen, D. (2003). Geoglyphs and GIS: Modeling transhumance in Northern Chile. En M. Doerr & A. Sarris (Eds.), *The digital heritage of archaeology: CAA 2002. Computer applications and quantitative methods in archaeology. Proceedings of the 30th Conference, Heraklion, Crete, April 2002* (pp. 179–184). Hellenic Ministry of Culture.

Jiménez-Badillo, D. (2012). Relative Neighbourhood Networks for Archaeological Analysis. In M. Zhou, I. Romanowska, Z. Wu, P. Xu, & P. Verhagen (Eds.), *Revive the Past: Proceedings of Computer Applications and Quantitative Techniques in Archaeology Conference 2011, Beijing* (pp. 370–380). Amsterdam University Press.

Jiménez-Badillo, D. (2023). Nearest and Relative Neighborhood Networks. En T. Brughmans et al. (Eds.), *The Oxford Handbook of Archaeological Network Research, Oxford Handbooks* (online ed., Oxford Academic, 20 Nov. 2023). https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198854265.013.9

Johnston, A. (1992). Anfore laconiche a Kommos. In P. Pelagatti (Ed.), *Lakonikà: Ricerche e nuovi materiali di ceramica laconica* (Supplemento al BdA 64, pp. 115–116). Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato.

Johnston, A. W. (2005). Kommos: Further Iron Age pottery. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens, 74*(3), 309–393.

Jones, D. W. (2000). *External Relations of Early Iron Age Crete, 1100–600 B.C.* (Archaeological Institute of America Monographs, New Series No. 4). University of Pennsylvania Museum.

Johnson, M. (2012). Phenomenological approaches in landscape archaeology. *Annual Review of Anthropology, 41*, 269–284. https://doi.org/10.1146/annurev-anthro-092611-145840

Jouffroy-Bapicot, I., Vannière, B., Iglesias, V., Debret, M., & Delarras, J.-F. (2016). 2000 years of grazing history and the making of the Cretan mountain landscape, Greece. *PLOS ONE, 11*(6), e0156875. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156875

Kansa, E., & Kansa, S. W. (2013). Open archaeology: We all know that a 14 is a sheep: Data publication and professionalism in archaeological communication. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies, 1*(1), 88–97. https://doi.org/10.5325/jeasmedarcherstu.1.1.0088

Kantor, H. J. (1947). *The Aegean and the Orient in the Second Millennium B.C.* Principia Press.

Kardulias, P. N., & Hall, T. D. (2008). Archaeology and world-systems analysis. *World Archaeology, 40*(4), 572-583.

Kemp, B. J., & Merrillees, R. S. (1980). *Minoan Pottery in Second Millennium Egypt.* Philipp von Zabern.

Keshtkar, A. R., Salajegheh, A., Sadoddin, A., & Allan, M. G. (2013). Application of Bayesian networks for sustainability assessment in catchment modeling and management (Case study: The Hablehrood River Catchment). *Ecological Modelling, 268*, 48–54. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.003

Khan, Z. R., Pittchar, J. O., Midega, C. A. O., & Pickett, J. A. (2018). Push-pull farming system controls fall armyworm: Lessons from Africa. *Outlooks on Pest Management, 29*(5), 220–224. https://doi.org/10.1564/v29_oct_09

Khazanov, A. M. (1984). *Nomads and the Outside World* (2ª ed.). University of Wisconsin Press.

Killebrew, A. E. (2019). Canaanite roots, proto-Phoenicia, and the early Phoenician period: c. 1300–1000 BCE. En C. López-Ruiz & B. R. Doak (Eds.), *The Oxford handbook of the Phoenician and Punic Mediterranean* (pp. 45–58). Oxford University Press.

Kintigh, K. W. (2006). The promise and challenge of archaeological data integration. *American Antiquity, 71*(3), 567-578

Kirch, P. (2005). Archaeology and global change: The Holocene record. *Annual Review of Environment and Resources, 30*, 409-440. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.29.102403.140700

Kirkpatrick, D. G., & Radke, J. D. (1985). A framework for computational morphology. En G. Toussaint (Ed.), *Machine Intelligence and Pattern*

Recognition (Vol. 2, pp. 217–248). Elsevier Science Publishers, North-Holland.

Kirsten, F., & Heinrich, J. (2022). Soil-sediment-configurations on slopes of Central and Western Crete (Greece) and their implications for late Holocene morphodynamics and pedogenesis – A conceptual approach. *Catena, 213*, 106238. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106238

Kitchen, K. A. (1990). The arrival of the Libyans in late New Kingdom Egypt. In A. Leahy (Ed.), *Libya and Egypt c.1300–750 BC* (pp. 15–27). Society for Libyan Studies.

Knapp, A. B. (1991). Spice, drugs, grain and grog: Organic goods in Bronze Age east Mediterranean trade. In N. H. Gale (Ed.), *Bronze Age trade in the Mediterranean: Papers presented at the conference held at Rewley House, Oxford, in December 1989* (pp. 21–68). Studies in Mediterranean Archaeology, Vol. 90. Paul Åströms Förlag.

Knapp, A. B. (2008). *Prehistoric and Protohistoric Cyprus: Identity, Insularity, and Connectivity.* Oxford University Press.

Knapp, A. B. (2012). Matter of fact: Transcultural contacts in the Late Bronze Age Eastern Mediterranean. In J. Maran & P. W. Stockhammer (Eds.), *Materiality and Social Practice: Transformative Capacities of Intercultural Encounters* (pp. 32–50). Oxbow Books.

Knapp, A. B. (2018). *Seafaring and Seafarers in the Bronze Age Eastern Mediterranean.* Leiden: Sidestone Press.

Knapp, A. B. (2021). *Migration Myths and the End of the Bronze Age in the Eastern Mediterranean.* Cambridge University Press.

Knapp, A. B., & Demesticha, S. (2017). *Mediterranean Connections: Maritime Transport Containers and Seaborne Trade in the Bronze and Early Iron Ages.* Routledge.

Knapp, A. B., & Manning, S. W. (2016). Crisis in context: The end of the Late Bronze Age in the Eastern Mediterranean. *American Journal of Archaeology, 120*(1), 99-149. https://doi.org/10.3764/aja.120.1.0099

Knapp, A. B., & van Dommelen, P. (Eds.). (2015). *The Cambridge Prehistory of the Bronze and Iron Age Mediterranean.* Cambridge University Press.

Knappett, C. (2011). *An Archaeology of Interaction: Network Perspectives on Material Culture and Society.* Oxford University Press.

Knappett, C. (Ed.). (2013). *Network Analysis in Archaeology: New Approaches to Regional Interaction.* Oxford University Press.

Knappett, C., Evans, T., & Rivers, R. (2008). Modelling maritime interaction in the Aegean Bronze Age. *Antiquity, 82*(318), 1009–1024. https://doi.org/10.1017/S0003598X0009774X

Knappett, C., Evans, T., & Rivers, R. (2011). The Theran eruption and Minoan palatial collapse: New interpretations gained from modelling the maritime

network. *Antiquity, 85*(329), 1008–1023. https://doi.org/10.1017/S0003598X00068459

Knappett, C., *&* Nikolakopoulou, I. (2015). Inside out? Materiality and connectivity in the Aegean archipelago. In A. B. Knapp *&* P. van Dommelen (Eds.), *The Cambridge Prehistory of the Bronze and Iron Age Mediterranean* (pp. 25–39). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CHO9781139028387.005

Knight, M. (1998). A geographic, archaeological, and scientific commentary on Strabo's Egypt (Geographika, Book 17, Sections 1-2) with an appendix on the Libyan chapters (Tesis Doctoral). New York University.

Knitter, D., Bebermeier, W., *&* Nakoinz, O. (Eds.). (2015). *Bridging the Gap – Integrated Approaches in Landscape Archaeology.* eTopoi. Journal for Ancient Studies, Special Volume 4, 13-17. Berlin: Exzellenzcluster 264 Topoi.

Knodell, A. R. (2021). *Societies in Transition in Early Greece: An Archaeological History.* Oakland, CA: University of California Press.

Knodell, A. R., *&* Leppard, T. P. (2018). *Regional Approaches to Society and Complexity: Studies in Honor of John F. Cherry.* Monographs in Mediterranean Archaeology.

Knossos Urban Landscape Project. (s.f.). Recuperado el 2 de julio de 2024, de https://www.ucl.ac.uk/archaeology/research/directory/knossos-urban-landscape-project

Kohler, T. A. (2012). Complexity, connectivity, and dynamic landscapes in the prehistoric northern Southwest. In M. A. Shannon (Ed.), *The Connected Past: Challenges to Network Studies in Archaeology and History* (pp. 95-114). Oxford: Oxford University Press.

Koller, D., *&* Friedman, N. (2009). *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques.* MIT Press.

Kontgis, C. (2021). Mapping the world in unprecedented detail. *Medium*. Recuperado el 2 de julio de 2024, de https://medium.com/impactobservatoryinc/mapping-the-world-in-unprecedented-detail-7c0513205b90

Kowalczyk, Z. (2020). *Landscape as a Network: Archaeological and Ethnographic Approaches to the Dewil Valley, Palawan, Philippines.* Poznan: Faculty of Archaeology, Adam Mickiewicz University in Poznań.

Kowalewski, S. A. (1990). Merits from full-coverage survey: Examples from the Valley of Oaxaca, Mexico. In S. K. Fish *&* S. A. Kowalewski (Eds.), *The Archaeology of Regions: A Case for Full-Coverage Survey* (pp. 33-85). Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press.

Kowalewski, S. A. (2008). Regional settlement pattern studies. *Journal of Archaeological Research, 16*(3), 225-285. https://doi.org/10.1007/s10814-008-9020-8

Kreibich, H., Van Loon, A. F., Schröter, K., Ward, P. J., Mazzoleni, M., Sairam, N., & Abeshu, G. W. (2022). The challenge of unprecedented floods and droughts in risk management. *Nature, 608*(7921), 80–86. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04917-5

Kristiansen, K., & Larsson, T. B. (2006). *La emergencia de la sociedad del Bronce: Viajes, transmisiones y transformaciones.* Akal.

Kröpelin, S., Verschuren, D., Lézine, A.-M., Eggermont, H., Cocquyt, C., Francus, P., ... & Oldfield, F. (2008). Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years. *Science, 320*(5877), 765–768. https://doi.org/10.1126/science.1154913

Kuper, R., & Kröpelin, S. (2006). Climate-controlled Holocene occupation in the Sahara. *Science, 313*(5788), 803–807. https://doi.org/10.1126/science.1130989

Kvamme, K. L. (2020). Analysing regional environmental relationships. In M. Gillings, P. Hacıgüzeller, & G. Lock (Eds.), *Archaeological Spatial Analysis: A Methodological Guide* (pp. 212-230). London, UK: Routledge. https://doi.org/10.4324/9781351243858

Laffineur, R., & Greco, E. (Eds.). (2005). *Emporia: Aegeans in the Central and Eastern Mediterranean*. Université de Liège, Histoire de l'art et archéologie de la Grèce antique; University of Texas at Austin, Program in Aegean Scripts and Prehistory.

Laguna Palma, D. (2018). Movilidad, conectividad y redes de intercambio en el Mediterráneo Oriental: El puerto de Kommos como caso de estudio. *Arqueología y Territorio, 15*, 87–99.

Laguna-Palma, D. (2023). Los retos del uso de las tecnologías digitales para la (re)construcción de las redes históricas en el contexto del Mar de Libia: El proyecto PERAIA. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada, 33*, 101–124.

Laguna-Palma, D. (2024). Enhancing archaeological heritage management: The PERAIA Project's open data database and web application. *Journal of Open Humanities Data, 10*(1), 2. https://doi.org/10.5334/johd.158

Laguna-Palma, D., & Barruezo-Vaquero, P. (2023). Landscapes of movement along the (pre)historical Libyan Sea: Keys for a socio-ecological history. *Open Archaeology, 9*(1), 20220346. https://doi.org/10.1515/opar-2022-0346.

Laguna-Palma, D., & Barruezo-Vaquero, P. (2024). Advancing the LOUD+FAIR Data Principles in Eastern Mediterranean Archaeological Research: Insights from the PERAIA Project. *Advances in Archaeological Practice*, 1–16. https://doi.org/10.1017/aap.2024.16

Laguna-Palma, D., Palacios, O., & Mokránová, K. (2023). Assessing the risks of northeastern African archaeological heritage and their relationship to human–environmental processes: A Bayesian network approach. *World Archaeology, 55*(3), 366–381. https://doi.org/10.1080/00438243.2024.2382138

Laguna-Palma, D., Toscano, M., & Rodríguez-Rellán, C. (2023). Building an Integrated Database of North-eastern African Archaeological and Heritage sites for Mapping Complex Social Landscapes. *Journal of Open Archaeology Data, 11*(5), 1-10. https://doi.org/10.5334/joad.99

Laguna-Palma, D., Toscano, M., & Rodríguez-Rellán, C. (2024). The Role of Aerial Prospection for Monitoring and Preserving Cultural Heritage in Northeastern Africa. *Heritage, 7*(2), 652–666. https://doi.org/10.3390/heritage7020032

Lake, M. (2012). Open archaeology. *World Archaeology, 44*(4), 471–478.

Lambrinoudakis, V. K. (1997). Voreioanatoliko Aigaio: nisia kai peraia. In C. Doumas & V. La Rosa (Eds.), *I Poliochni kai i Proimi Epoxi tou Chalkou sto voreio Aigaio. Proceedings of the International Conference, Athens, 22–25 April 1996* (pp. 666–677). Atenas: Scuola Archeologica Italiana di Atene, Universidad de Atenas.

Lambrou-Phillipson, C. (1990). *Hellenorientalia: The Near Eastern Presence in the Bronze Age Aegean, ca. 3000–1100 B.C.* Paul Åströms Förlag.

Lambrou-Phillipson, C. (1991). Seafaring in the Bronze Age Mediterranean: The parameters involved in maritime travel. In R. Laffineur & L. Basch (Eds.), *Thalassa: L'Égée préhistorique et la mer* (pp. 1–20). Aegaeum 7. Université de Liège.

Lammers-Keijsers, Y. M. (2005). Scientific experiments: A possibility? Presenting a general cyclical script for experiments in archaeology. *EuroREA, 2*, 18-24.

Langmuir, E. (1984). *Mountaincraft and leadership: A handbook for mountaineers and hillwalking leaders in the British Isles* (1ª ed.). Edinburgh: Scottish Sports Council.

Latour, B. (2006). *Reassembling the social: An introduction to actor-network-theory*. Oxford: Oxford University Press.

Lawrence, A. (2012). Electronic documents in a print world: Grey literature and the internet. *Media International Australia, 143*, 122–131. https://doi.org/10.1177/1329878X1214300114

Layton, R., & Ucko, P. J. (Eds.). (1999). *The archaeology and anthropology of landscape: Shaping your landscape*. Routledge.

Leahy, A. (Ed.). (1990). *Libya and Egypt c. 1300–750 BC*. SOAS Centre of Near and Middle Eastern Studies and the Society for Libyan Studies.

Leidwanger, J. (2013). Modeling distance with time in ancient Mediterranean seafaring: A GIS application for the interpretation of maritime connectivity. *Journal of Archaeological Science, 40*(8), 3302–3308. https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.03.016

Leidwanger, J. (2017). From time capsules to networks: New light on Roman shipwrecks in the maritime economy. *American Journal of Archaeology, 121*(4), 595–619. https://doi.org/10.3764/aja.121.4.0595

Leidwanger, J., & Knappett, C. (Eds.). (2018). *Maritime networks in the ancient Mediterranean world*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108555685

Léger, A., Duval, C., Weber, P., Levrat, E., & Farret, R. (2006). Bayesian network modelling the risk analysis of complex socio-technical systems. En *Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD)*, Nancy, France.

Lethbridge, E., & Hartman, S. (2016). Inscribing environmental memory in the Icelandic sagas and the Icelandic saga map. *Publications of the Modern Language Association of America, 131*, 381-391.

Lewin, R. (1992). *Complexity: Life at the edge of chaos*. University of Chicago Press.

Liceras-Garrido, R., & Jimeno-Martínez, A. (2016). Aproximación al modelo de explotación de recursos en el territorio de Numancia. En *Manual de Tecnologías de la Información Geográfica aplicadas a la Arqueología* (pp. 137–158). Museo Arqueológico Regional.

Lindsay, I., & Mkrtchyan, A. (2023). Free and low-cost aerial remote sensing in archaeology: An overview of data sources and recent applications in the South Caucasus. *Advances in Archaeological Practice, 11*(2), 164-183. https://doi.org/10.1017/aap.2023.3.

Llobera, M. (2000). Understanding movement: A pilot model towards the sociology of movement. En G. Lock (Ed.), *Beyond the Map: Archaeology and Spatial Technologies* (pp. 65–84). IOS Press.

Llobera, M. (2020). Memory at your feet: Modeling the agency of past trails. *Journal of Archaeological Science: Reports, 29*, 102177. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102177

Llobera, M., Fábrega-Álvarez, P., & Parcero-Oubiña, C. (2011). Order in movement: A GIS approach to accessibility. *Journal of Archaeological Science, 38*(4), 843–851. https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.11.006

Lock, G. (2000). *Beyond the map: Archaeology and spatial technologies*. IOS Press.

Lock, G., & Stančič, Z. (Eds.). (1995). *Archaeology and geographical information systems: A European perspective*. London: Taylor & Francis.

López-Ruiz, C. (2022). *Phoenicians and the Making of the Mediterranean*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

MacGillivray, J. A., & Sackett, L. H. (1984). An Archaeological Survey of the Roussolakkos Area at Palaikastro. *Annual of the British School at Athens, 79*, 129–159. https://doi.org/10.1017/S0068245400019894

Maddison, M. S. (2020). Percolation analysis. En M. Gillings, P. Hacıgüzeller, & G. Lock (Eds.), *Archaeological spatial analysis: A methodological guide* (pp. 77–92). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781351243858

Maddison, M. S., & Schmidt, S. C. (2020). Percolation analysis: Archaeological applications at widely different spatial scales. *Journal of Computer Applications in Archaeology, 3*(1), 269–287. https://doi.org/10.5334/jcaa.54

MAEASAM. (s.f.). Mapping Africa's Endangered Archaeological Sites and Monuments. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://maeasam.org/

MAHSA. (s.f.). Mapping Archaeological Heritage in South Asia. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://www.mahsa.arch.cam.ac.uk/

Manière, L., Crépy, M., & Redon, B. (2021). Building a model to reconstruct the Hellenistic and Roman road networks of the Eastern Desert of Egypt, a semi-empirical approach based on modern travelers' itineraries. *Journal of Computer Applications in Archaeology, 4*(1), 20–46.

MAPHSA. (s.f.). Mapping the Archaeological Pre-Columbian Heritage of South America. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://www.upf.edu/web/maphsa

Marchetti, N., Angelini, I., Artioli, G., Benati, G., Bitelli, G., Curci, A., Marfia, G., & Roccetti, M. (2018). NEARCHOS: Networked Archaeological Open Science: Advances in archaeology through field analytics and scientific community sharing. *Journal of Archaeological Research, 26*(4), 447–469. https://doi.org/10.1007/s10814-017-9112-4

MAREA – Maritime Endangered Archaeology. (s.f.). Recuperado de https://marea.soton.ac.uk/

Marinatos, N. (1998). The Tell el-Dabʿa paintings: A study in pictorial tradition. *Ägypten und Levante, 8*, 83–100.

Markonis, Y., Angelakis, A. N., Christy, J., & Koutsoyiannis, D. (2016). Climatic variability and the evolution of water technologies in Crete, Hellas. *Water History, 8*(2), 137–157. https://doi.org/10.1007/s12685-016-0159-9

Marquardt, W. H. (2019). Dialectic in historical ecology. En C. Ray & M. Fernández-Götz (Eds.), *Historical ecologies, heterarchies and transtemporal landscapes* (pp. 11–31). Routledge.

Márquez-Pérez, J., Vallejo-Villalta, I., & Álvarez-Francoso, J. I. (2017). Estimated travel time for walking trails in natural areas. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography, 117*(1), 53–62. https://doi.org/10.1080/00167223.2017.1316212

Martin, R., & Sunley, P. (2007). Complexity thinking and evolutionary economic geography. *Journal of Economic Geography, 7*(5), 573–601.

Martín-Bueno, M., & Sáenz-Preciado, J. C. (Eds.). (2017). *Topografía aplicada a la arqueología.* Universidad de Zaragoza.

Martín Civantos, J. M. (2007). Il territorio stratificato: Proposte dall'archeologia del paesaggio. En R. Francovich & M. Valenti (Eds.), *Atti del IV Congresso Nazionale di Archeologia Medievale* (pp. 3–7). Florencia.

Martín Civantos, J. M. (2008). Arqueología y recursos naturales: Notas para la arqueología del paisaje. En J. M. Martín Civantos (Ed.), *Medio ambiente y arqueología medieval* (pp. 17–40). Alhulia.

Martín Civantos, J. M. (2011). Working in landscape archaeology: The social and territorial significance of the agricultural revolution in al-Andalus. *Early Medieval Europe, 19*(4), 385–410.

Martín Civantos, J. M. (2018). La arqueología del paisaje como lugar donde hacer realmente compleja nuestra disciplina. En J. A. Quirós Castillo (Ed.), *Treinta años de arqueología medieval en España* (pp. 205–224). Archaeopress.

Marwick, B. (2016). Computational reproducibility in archaeological research: Basic principles and a case study of their implementation. *Journal of Archaeological Method and Theory, 23*, 1–27. https://doi.org/10.1007/s10816-015-9272-9

Marwick, B., d'Alpoim, J., Barton, C. M., Bates, L., Baxter, M., Bewan, A., Bollwerk, E., Bocinsky, R. K., Brughmans, T., Carter, A. K., et al. (2017). Open science in archaeology. *SAA (Society of American Archaeology) Archaeological Record, September,* 8–14. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/3D6XX

Mayoral Herrera, V., & Sevillano Perea, L. (2016). Tecnologías de información geográfica y prospección arqueológica: Problemática general y algunos casos de estudio. En M. C. Mínguez García & E. Capdevila Montes (Eds.), *Manual de tecnologías de la información geográfica aplicadas a la arqueología* (pp. 79–113). Museo Arqueológico Regional de Madrid, Comunidad de Madrid.

Mayoral-Herrera, V., Parcero-Oubiña, C., & Fábrega-Álvarez, P. (Eds.). (2017). *Archaeology and geomatics: Harvesting the benefits of 10 years of training in the Iberian Peninsula (2006–2015).* Sidestone Press.

McCormick, M. (2001). *Origins of the European economy: Communications and commerce, AD 300-900.* Cambridge University Press.

McGlade, J. (1995). Archaeology and the ecodynamics of human-modified landscapes. *Antiquity, 69*, 113–132.

McGlade, J. (1999). Arqueología, dinámica no lineal y discurso histórico. *Trabajos de Prehistoria, 56*(2), 5–18.

McGlade, J., & Van Der Leeuw, S. (Eds.). (1997). Introduction: Archaeology and non-linear dynamics – New approaches to long-term change. En J. McGlade & S. Van Der Leeuw (Eds.), *Time, process and structured transformation in archaeology* (pp. 1–32). London and New York: Routledge.

McGovern, T. H., Hambrecht, G., & Hicks, M. (2019). Historical ecology and longitudinal research strategies around Lake Mývatn, Iceland. En C. Ray & M. Fernández-Götz (Eds.), *Historical ecologies, heterarchies and transtemporal landscapes* (pp. 32–42). Routledge.

McLean, A., & Rubio-Campillo, X. (2022). Beyond least cost paths: Circuit theory, maritime mobility and patterns of urbanism in the Roman Adriatic. *Journal of Archaeological Science, 138*, 105534. https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105534

McManamon, F. P., Kintigh, K. W., Ellison, L. A., & Brin, A. (2017). tDAR: A cultural heritage archive for twenty-first-century public outreach, research, and resource management. *Advances in Archaeological Practice, 5*(3), 238–249.

MedAfrica. (s.f.). Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://www.medafrica-cam.org/

Mehrer, M. W., & Wescott, K. L. (2006). *GIS and archaeological site location modeling.* Boca Raton: CRC Press.

Menéndez-Marsh, F., Al-Rawi, M., Fonte, J., Dias, R., Gonçalves, L. J., Seco, L. G., et al. (2023). Geographic information systems in archaeology: A systematic review. *Journal of Computer Applications in Archaeology, 6*(1), 40–50.

Menze, B. H., & Ur, J. A. (2012). Mapping patterns of long-term settlement in Northern Mesopotamia at a large scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109*(14), E778–E787. https://doi.org/10.1073/pnas.1115472109

Merriman, N., & Swain, H. (1999). Archaeological archives: Serving the public interest? *European Journal of Archaeology, 2*(2), 249–267.

Merritt, W. S., Reddy, V. R., Patch, B., & Syme, G. J. (2016). Modelling livelihoods and household resilience to droughts using Bayesian networks. *Environment, Development and Sustainability, 18*(2), 315–346. https://doi.org/10.1007/s10668-015-9650-1

Meyer, W., & Crumley, C. (2011). Historical ecology: Using what works to cross the divide. En T. Moore & L. Armada (Eds.), *Atlantic Europe in the first millennium BC: Crossing the divide* (pp. 109–134). Oxford: Oxford University Press.

Mickel, A. (2016). Tracing teams, texts, and topics: Applying social network analysis to understand archaeological knowledge production at Çatalhöyük. *Journal of Archaeological Method and Theory, 23*(4), 1095–1126.

Milek, K. (2018). Transdisciplinary archaeology and the future of archaeological practice: Citizen science, portable science, ethical science. *Norwegian Archaeological Review, 51*(1–2), 36–47. https://doi.org/10.1080/00293652.2018.1552312

Mills, B. J. (2017). Social network analysis in archaeology. *Annual Review of Anthropology, 46*, 379–397.

MINERVA. (s.f.). Understanding the Roman economy. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://projects.au.dk/minerva

Mínguez García, M. del C., & Capdevilla Montes, E. (Eds.). (2016). *Manual de tecnologías de la información geográfica aplicadas a la arqueología.* Museo Arqueológico Regional de Madrid, Comunidad de Madrid.

Mishra, M. (2021). Machine learning techniques for structural health monitoring of heritage buildings: A state-of-the-art review and case studies. *Journal of Cultural Heritage, 47*, 227–245. https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.09.005

Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour.* Oxford University Press.

Mojaddadi, H., Pradhan, B., Nampak, H., Ahmad, N., & Halim, A. G. (2017). Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, 8*(2), 1080–1102. https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1294113

Möller, H., & Rieger, A.-K. (2019). Necessity is the mother of invention: The fuel of Graeco-Roman pottery kilns in the semi-arid Eastern Marmarica. En R. Veal & V. Leitch (Eds.), *Fuel and Fire in the Ancient Roman World: Towards an Integrated Economic Understanding* (pp. 71–86). McDonald Institute for Archaeological Research.

Montufo Martín, A. M. (1991). Aplicaciones de la teledetección en arqueología. Una revisión crítica. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada, 16*, 425-451.

Moody, J. (2000). Holocene climate change in Crete: An archaeologist's view. En P. Betancourt, V. Karageorghis, R. Laffineur, & W. Niemeier (Eds.), *Meletemata: Studies in Aegean Archaeology Presented to Malcolm H. Wiener as He Enters His 65th Year* (pp. 475-481). Liège and Austin: Université de Liège and University of Texas at Austin.

Moody, J. (2016). The Roman climate in the southwest Aegean: Was it really different? In J. Moody, E. K. Papadopoulou, & L. Preston (Eds.), *Roman Crete: New perspectives* (pp. 157–176). Oxbow Books. https://doi.org/10.2307/j.ctvh1drr7.10

Moore, R., & Richards, J. D. (2015). Here today, gone tomorrow: Open access, open data and digital preservation. In A. Wilson & B. Edwards (Eds.), *Open source archaeology* (pp. 30–43). Walter de Gruyter.

Moorey, C. (2019). *A history of Crete.* Yale University Press.

Moreno-Navarro, F. (2022). Simulación y análisis del sistema de transporte en el norte de la Carpetania romana. Una aproximación desde los SIG y análisis de redes. *Zephyrus - Revista de Prehistoria y Arqueología, 89*, 191–211. Universidad de Salamanca, Ediciones.

Moreno Navarro, F. (2023). *Paisajes, territorio y economías domésticas en el norte de la Carpetania romana: Una aproximación desde la ciencia de redes* [Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid].

Moschovakis, Y. N. (2001). What is an algorithm? En B. Engquist & W. Schmid (Eds.), *Mathematics unlimited: 2001 and beyond* (pp. 919–936). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56478-9_46

Mourtzas, N., & Kolaiti, E. (2017a). Geoarchaeology of the Roman harbour of Ierapetra (SE Crete, Greece). *Méditerranée, (129)*. https://doi.org/10.4000/mediterranee.7965.

Mourtzas, N., & Kolaiti, E. (2017b). Shoreline reconstruction of the submerged Minoan harbour morphology in the bay of Kato Zakros (Eastern Crete,

Greece). *Journal of Archaeological Science: Reports, 12*, 684–698. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.03.026

Mourtzas, N., & Kolaiti, E. (2020). Palaeogeographic reconstruction of the Messara Gulf and Matala Bay (Crete, Greece): Coastal response to sea level changes during prehistoric and historic times. *Alpine and Mediterranean Quaternary, 33*(1), 61–87. https://doi.org/10.26382/AMQ.2020.04

Mourtzas, N., & Kolaiti, E. (2021). Palaeogeography of Ancient Lasaia (SE Crete, Greece): The evolution of a harbour from the Minoan palatial period to Roman times. *Méditerranée, (127).* https://doi.org/10.4000/mediterranee.12549

Mourtzas, N., Kolaiti, E., & Anzidei, M. (2016). Vertical land movements and sea level changes along the coast of Crete (Greece) since Late Holocene. *Quaternary International, 401*, 43–70. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.08.008

Murrieta-Flores, P. (2012). Understanding human movement through spatial technologies: The role of natural areas of transit in the Late Prehistory of South-western Iberia. *Trabajos de Prehistoria, 69*(1), 103–122.

Nagarajan, R., Scutari, M., & Lèbre, S. (2013). *Bayesian networks in R: With applications in systems biology*. Springer.

Nail, T. (2017). *Theory of the border*. Oxford: Oxford University Press.

Naïm, P., Wuillemin, P. H., Leray, P., Pourret, O., & Becker, A. (2011). *Réseaux bayésiens*. Paris: Editions Eyrolles.

Naismith, N. N. (1892). Excursions: Cruach Ardran, Stobinian, and Ben More. *Scottish Mountaineering Club Journal, 2.* Recuperado de http://gdl.cdlr.strath.ac.uk/smcj/smcj009/smcj0090603.htm

Nakoinz, O., & Knitter, D. (2016). *Modelling human behaviour in landscapes*. New York: Springer.

Nibbi, A. (1998). Marsa Matruh as a harbour and as a measure of the size of ancient ships. *Studien zur altägyptischen Kultur, 26*, 203–212.

Niccolucci, F., & Richards, J. (Eds.). (2019). *The ARIADNE impact*. Archaeolingua Foundation.

Nicholson, C., Kansa, S., Gupta, N., & Fernandez, R. (2023). Will it ever be FAIR? Making archaeological data findable, accessible, interoperable, and reusable. *Advances in Archaeological Practice, 11*(1), 63–75. https://doi.org/10.1017/aap.2022.40

Nielsen, N. (2017). Cereal cultivation and nomad-sedentary interactions at the Late Bronze Age settlement of Zawiyet Umm el-Rakham. *Antiquity, 91*(360), 1561–1573.

Nielsen, N. (2024). *Subsistence strategies and craft production at the ancient Egyptian Ramesside fort of Zawiyet Umm el-Rakham*. Bloomsbury Egyptology.

Nikolaus, J., Mohamed Abdrbba, M. O., & Emrage, A. (2022). The Cyrenaica Coastal Survey Project: Documenting endangered maritime heritage in

Libya. *Journal of Maritime Archaeology, 17*(3), 421–444. https://doi.org/10.1007/s11457-022-09336-1

Nitya, R., Singh, C., Solomon, D., Camfield, L., Sidiki, R., Angula, M., Poonacha, P., Sidibé, A., & Lawson, E. T. (2020). Managing risk, changing aspirations and household dynamics: Implications for wellbeing and adaptation in semi-arid Africa and India. *World Development, 125*, 104667. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104667

Nowicki, K. (2000). *Defensible Sites in Crete c. 1200-800 B.C.: LM IIIB/IIIC through Early Geometric*. Université de Liège, Histoire de l'art et archéologie de la Grèce antique; University of Texas at Austin, Program in Aegean Scripts and Prehistory.

Nixon, L., Moody, J., Price, S., Rackham, O., & Niniou-Kindeli, V. (1990). Archaeological Survey in Sphakia, Crete. *Echos du Monde Classique/Classical Views, n.s. 9*, 213–220.

Noy, N. F., & McGuinness, D. L. (2001). Ontology development 101: A guide to creating your first ontology. *Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05, and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880*.

O'Connor, D. (1983). New Kingdom and Third Intermediate Period, 1552–664 BC. En B. G. Trigger, B. J. Kemp, D. O'Connor, & A. B. Lloyd (Eds.), *Ancient Egypt: A Social History* (pp. 183–278). Cambridge University Press.

O'Connor, D. (1990). The nature of Tjemhu (Libyan) society in the later New Kingdom. En A. Leahy (Ed.), *Libya and Egypt c. 1300–750 BC* (pp. 29–113). Society for Libyan Studies.

O'Connor, D., & Quirke, S. (Eds.). (2003). *Mysterious Lands*. UCL Press.

Olaya, V. (2016). *Sistemas de información geográfica*. Autoedición.

Open Knowledge Foundation. (2023). What is open data? *The Open Data Handbook*. http://opendatahandbook.org/guide/en/what-is-open-data/

Open Topography. (s.f.). Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://opentopography.org/

Opitz, R. (2018). Publishing archaeological excavations at the digital turn. *Journal of Field Archaeology, 43*(1), 68–82. https://doi.org/10.1080/00934690.2018.1505409

Opitz, R., & Herrmann, J. (2018). Recent trends and long-standing problems in archaeological remote sensing. *Journal of Computer Applications in Archaeology, 1*(1), 19–41.

Opitz, R., Nuninger, L., & Fruchart, C. (2012). Thinking topographically about the landscape around Besançon (Doubs, France): From a multi- to an interdisciplinary approach. En S. Kluiving & E. Guttmann-Bond (Eds.), *Landscape archaeology between art and science* (pp. 395-412). Amsterdam: Amsterdam University Press.

Opitz, R., Strawhacker, C., Buckland, P., Cothren, J., Dawson, T., Dugmore, A., Hambrecht, G., Koster, W., Lethbridge, E., Mainland, I., McGovern, T., Newton, A., Palsson, G., Ryan, T., Streeter, R., Stade, E., Szabo, V., & Thompson, P. (2021). A lockpick's guide to dataARC: Designing infrastructures and building communities to enable transdisciplinary research. *Internet Archaeology, 56*. https://doi.org/10.11141/ia.56.15

Orejas, A. (1998). El estudio del paisaje: Visiones desde la arqueología. *Arqueología Espacial: Arqueología del Paisaje, 19-20*, 9-19.

ORBIS. The Stanford geospatial network model of the Roman world. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://orbis.stanford.edu/

Orengo, H. A., & Livarda, A. (2016). The seeds of commerce: A network analysis-based approach to the Romano-British transport system. *Journal of Archaeological Science, 66*, 21–35. https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.12.003

Orton, C. (1988). *Matemáticas para arqueólogos*. Madrid, España: Alianza Editorial.

Øye, I. (2009). On the margins of the medieval farm - Norwegian cases. En J. Klápště & P. Sommer (Eds.), *Medieval rural settlement in marginal landscapes. Ruralia VII* (pp. 99-107). Brepols.

Östborn, P., & Gerding, H. (2014). Network analysis of archaeological data: A systematic approach. *Journal of Archaeological Science, 46*, 75-88. https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.03.015

Östborn, P., & Gerding, H. (2015). The diffusion of fired bricks in Hellenistic Europe: A similarity network analysis. *Journal of Archaeological Method and Theory, 22*(1), 306-344. https://doi.org/10.1007/s10816-014-9229-4

Östborn, P., & Gerding, H. (2023). Inference from archaeological similarity networks. En T. Brughmans, B. J. Mills, J. L. Munson, & M. A. Peeples (Eds.), *The Oxford Handbook of Archaeological Network Research*. Oxford University Press.

Oxford English Dictionary. (2024). Movement. Recuperado el 01 de abril de 2024, de https://www.oed.com/dictionary/movement_n?tab=meaning_and_use#35817689

Pailes, M. (2014). Social network analysis of Early Classic Hohokam corporate group inequality. *American Antiquity, 79*(3), 465–486. https://doi.org/10.7183/0002-7316.79.3.465

Palacios, O. (2023a). Aplicación del aprendizaje automático en Arqueología: ¿Un cambio de paradigma? *Vegueta. Anuario de la Facultad de Geografía e Historia, 23*(1), 147–186. https://doi.org/10.51349/veg.2023.1.06

Palacios, O. (2023b). *Predicting the past: Subsistence, organisation, and survival of early agropastoral communities* (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España.

Palacios, O., Barceló, J. A., Delgado, R., & Albuquerque, U. P. (2022). Exploring the role of ecology and social organisation in agropastoral societies: A

Bayesian network approach. *PLoS One, 17*(10), e0276088. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276088

Palacios-Jurado, H., Martín-Bueno, M. A., & Uribe Agudo, P. (2017). La aplicación de la tecnología a la arqueología. En *Topografía aplicada a la arqueología* (pp. 99–125). Zaragoza: Universidad de Zaragoza.

Pan, Y., Zhang, L., Li, Z., & Ding, L. (2019). Improved fuzzy Bayesian network-based risk analysis with interval-valued fuzzy sets and D–S evidence theory. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 28*(9), 2063–2077. https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2019.2929024

Pappas, C., & Williams, I. (2011). Grey literature: Its emerging importance. *Journal of Hospital Librarianship, 11*(3), 228–234. https://doi.org/10.1080/15323269.2011.587100

Parcak, S. (2009). *Satellite remote sensing for archaeology*. New York: Routledge.

Parcak, S., Gathings, D., Childs, C., Mumford, G., & Cline, E. (2016). Satellite evidence of archaeological site looting in Egypt: 2002–2013. *Antiquity, 90*(349), 188–205.

Parcero-Oubiña, C. (2018). La crítica del determinismo en el análisis espacial arqueológico. *Journal of Archaeological Method and Theory, 25*(2), 45–58.

Parcero Oubiña, C., & González Pérez, C. (2007). Los SIG y la gestión de la información arqueológica. En V. Mayoral Herrera & S. Celestino Pérez (Eds.), *Tecnologías de información geográfica y análisis arqueológico del territorio. Actas del V Simposio Internacional de Arqueología de Mérida* (pp. 481–489). Mérida: Instituto de Arqueología.

Pardo-Gordó, S. (2017). Sistemas complejos adaptativos y simulación computacional en arqueología. *Trabajos de Prehistoria, 74*(1), 9–25. https://doi.org/10.3989/tp.2017.12181

París Roche, A. (2002). *Método de Información para Excursiones (MIDE).*

Park, H.-T. (2009). Boundary effects on the intelligibility and predictability of spatial systems. En D. Koch, L. Marcus, & J. Steen (Eds.), *Proceedings of the Seventh International Space Syntax Symposium* (pp. 086:1–086:12). Stockholm: Royal Institute of Technology.

Pashley, R. (2012a). *Travels in Crete (Cambridge Library Collection - Travel, Europe) (Volume 1).* Cambridge: Cambridge University Press.

Pashley, R. (2012b). *Travels in Crete (Cambridge Library Collection - Travel, Europe) (Volume 2).* Cambridge: Cambridge University Press.

Pažout, A. (2017). The Roman Road system in the Golan: Highways, paths and tracks in quotidian life. *Journal of Landscape Ecology, 10*(3), 11–24.

Pearce, N., Weller, M., Scanlon, E., & Kinsley, S. (2010). Digital scholarship considered: How new technologies could transform academic work. *Education, 16*(1).

Pelagios. (s.f.). Connecting historical places. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://pelagios.org/

Pendlebury, J. D. S. (1930). *Aegyptiaca: A Catalogue of Egyptian Objects in the Aegean Area*. Cambridge University Press.

Pendlebury, J. D. S. (1939). *The archaeology of Crete: An introduction*. Methuen & Co.

Pendlebury, J. D. S., Money-Coutts, M. B., & Eccles, E. (1933). Journeys in Crete, 1934. *The Annual of the British School at Athens, 33*, 80–100.

PERAIA. (s.f.). *Proyecto PERAIA*. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://peraia.ugr.es

Petrosyan, A., Azizbekyan, H., Gasparyan, B., Dan, R., Bobokhyan, A., & Amiryan, M. (2021). Foregrounding daily data collection on archaeological fieldwork. *Advances in Archaeological Practice, 9*(4), 402–414.

Phillips, J. (2008). *Aegyptiaca on the Island of Crete in Their Chronological Context: A Critical Review*. Volúmenes I y II. Viena: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Pike, K. L. (1990). Emics and etics: The insider/outsider debate. In T. N. Headland, K. L. Pike, & M. Harris (Eds.), *Emics and etics: The insider/outsider debate* (pp. 28-47). Newbury Park, CA: Sage Publications.

Pike, K. L. (1954). *Language in relation to a unified theory of the structure of human behavior*. Glendale, CA: Summer Institute of Linguistics.

Pirenne, H. (1937/2019). *Mohammed and Charlemagne*. Princeton University Press.

Pleiades. (s.f.). A community-built gazetteer and graph of ancient places. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://pleiades.stoa.org/

Plog, S., Plog, F., & Wait, W. (1978). Decision making in modern surveys. En M. Schiffer (Ed.), *Advances in archaeological method and theories* (Vol. 1, pp. 383–421). New York: Academic Press.

Polla, S., & Verhagen, P. (2014). *Computational Approaches to the Study of Movement in Archaeology*. De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783110266436

Pollard, D. (2022). *Between the Mountains and the Sea: Landscapes of Settlement, Subsistence and Funerary Practice in Later Bronze Age and Iron Age Crete* (Tesis doctoral). University College London.

Pöllath, N., & Rieger, A.-K. (2011). Insights into diet and economy of the Eastern Marmarica—Faunal remains from Greco-Roman sites in northwestern Egypt (Abar el-Kanayis, Wadi Umm el-Ashdan and Wadi Qasaba). *Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Abteilung Kairo, 67*, 163–180.

Pollock, S. (2016). Archaeology and contemporary warfare. *Annual Review of Anthropology, 45*(1), 215–231.

Porter, B. W. (2013). Sharing data is hard! But worth it. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies, 1*(1), 100–101. https://doi.org/10.5325/jeasmedarcherstu.1.1.0100

Pratt, D. (2013). Not an either/or proposition: Combining interpretive and data publication. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies, 1*(1), 101–192. https://www.muse.jhu.edu/article/501748

Prendergast, F. (2015). An architectural perspective on structured sacred space – Recent evidence from Iron Age Ireland. En F. Silva & N. Campion (Eds.), *Skyscapes: The role and importance of the sky in archaeology* (pp. 87–105). Oxford: Oxbow Books.

Preucel, R. W., & Meskell, L. (2007). Places. En R. W. Preucel & L. Meskell (Eds.), *A companion to social archaeology* (pp. 215–229). Oxford: Blackwell Publishing.

Proulx, B. B. (2013). Archaeological site looting in "glocal" perspective: Nature, scope, and frequency. *American Journal of Archaeology, 117*, 111–125.

Quézel, P. (1978). Analysis of the flora of Mediterranean and Saharan Africa. *Annals of the Missouri Botanical Garden, 65*(2), 479–534. https://doi.org/10.2307/2398860.

Quirós Hernández, M., & Cabero Diéguez, M. (2011). *Tecnologías de la información geográfica (TIG): Cartografía, fotointerpretación, teledetección y SIG*. Ediciones Universidad de Salamanca.

R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.

Raab, H. A. (2001). *Rural settlement in Hellenistic and Roman Crete: The Akrotiri Peninsula*. Archaeopress.

Rackham, O., & Moody, J. (1996). *The making of the Cretan landscape*. Manchester University Press.

Rackham, O., Moody, J., Nixon, L., & Price, S. (2010). Some field systems in Crete. *Annual of the British School at Athens, 105*, 353–367.

Ramazzotti, M. (2020). Modelling the past: Logics, semantics and applications of neural computing in archaeology. *Archeologia e Calcolatori, 31.2*, 169-180. https://doi.org/10.19282/ac.31.2.2020.16

Rawat, N. S., Brughmans, T., Nautiyal, V., & Chauniyal, D. D. (2021). Networked medieval strongholds in Garhwal Himalaya, India. *Antiquity, 95*(381), 753–772. https://doi.org/10.15184/aqy.2021.4

Ray, C. (2019). Historical ecologies, heterarchies and transtemporal landscapes: Introductory perspectives. In C. Ray & M. Fernández-Götz (Eds.), *Historical ecologies, heterarchies and transtemporal landscapes: Introductory perspectives* (pp. 1–8). Routledge.

Ray, N., & Nikolaus, J. (2022). Changing urban environments and the impact on coastal cultural heritage at Marsa Matruh, Egypt. *Journal of Maritime Archaeology, 17*(3), 445–464. https://doi.org/10.1007/s11457-022-09337-0

Rayne, L., & Donoghue, D. (2018). A remote sensing approach for mapping the development of ancient water management in the Near East. *Remote Sensing, 10*(12), 1–21.

Rayne, L., Bradbury, J., Mattingly, D., Philip, G., Bewley, R., & Wilson, A. (2017). Endangered archaeology in the Middle East and North Africa: Introducing the EAMENA project. *Journal of Field Archaeology, 42*(6), 531–544.

Rayne, L., Bradbury, J., Mattingly, D., Philip, G., Bewley, R., & Wilson, A. (2017). From above and on the ground: Geospatial methods for recording endangered archaeology in the Middle East and North Africa. *Geosciences, 7*(4), 100. https://doi.org/10.3390/geosciences7040100

Rayne, L., Gatto, M. C., Abdulaati, L., Al-Haddad, M., Sterry, M., Sheldrick, N., & Mattingly, D. (2020). Detecting change at archaeological sites in North Africa using open-source satellite imagery. *Remote Sensing, 12*(22), 3694.

Real Academia Española. (2024). *Movimiento*. Recuperado el 1 de abril de 2024, de https://dle.rae.es/movimiento

Real Academia Española. (s.f.). *Nomenclátor*. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://dle.rae.es/nomencl%C3%A1tor

Redman, C. L., & Kinzig, A. P. (2003). Resilience of past landscapes: Resilience theory, society, and the longue durée. *Conservation Ecology, 7*(1), 14.

Redman, C. L., James, S. R., Fish, P. R., & Rogers, J. D. (Eds.). (2004). *The archaeology of global change: The impact of humans on their environment*. Smithsonian Books.

Region of Crete. (s.f.). *GIS Crete*. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://gis.crete.gov.gr/

Rehak, P. (1998). Aegean natives in the Theban tomb paintings: The Keftiu revisited. In E. H. Cline & D. Harris-Cline (Eds.), *The Aegean and the Orient in the Second Millennium BC* (pp. 39–51). Aegaeum 18. Université de Liège.

Rejas Ayuga, J. G., & Burillo Mozota, F. (2016). Teledetección aplicada a la arqueología. En M. del C. Mínguez García & E. Capdevila Montes (Coords.), *Manual de tecnologías de la información geográfica aplicadas a la arqueología* (pp. 241–270). Madrid: Ediciones del Ministerio de Cultura.

Renfrew, C. (1993). Cognitive archaeology: Some thoughts on the archaeology of thought. *Cambridge Archaeological Journal, 3*(2), 248–250.

Renfrew, C. (1994). *Prehistory: The making of the human mind*. Random House.

Retaillé, D. (2013). From nomadic to mobile space: A theoretical experiment (1976–2012). In J. Miggelbrink, J. O. Habeck, N. Mazzullo, & P. Koch (Eds.), *Nomadic and indigenous spaces: Productions and cognitions* (pp. 171–184). Ashgate.

Richards, J. D. (2002). Digital preservation and access. *European Journal of Archaeology, 5*(3), 343–366.

Richards, J. D. (2004). Online archives. *Internet Archaeology, 15.* https://doi.org/10.11141/ia.15.7

Richards, J. D. (2017). Twenty years preserving data: A view from the United Kingdom. *Advances in Archaeological Practice, 5*(3), 227–237. https://doi.org/10.1017/aap.2017.11

Richards, J. D., & Hardman, C. S. (2008). Stepping back from the trench edge: An archaeological perspective on the development of standards for recording

and publication. In M. Greengrass & L. Hughe (Eds.), *The virtual representation of the past* (pp. 101–112). Ashgate.

Richardson, L.-J. (2018). Ethical challenges in digital public archaeology. *Journal of Computer Applications in Archaeology, 1*(1), 64–73. https://doi.org/10.5334/jcaa.13

Rieger, A.-K. (2017). The various ways of being mobile: Habitual knowledge, life-strategies and the ancient route networks on the Eastern Marmarica-Plateau (Northern Libyan Desert). *Open Archaeology, 3*, 49–68.

Rieger, A.-K. (2017a). Text and landscape: The complementarity of the Papiro Vaticano Greco 11 R (PMarm) to landscape-archaeological results from the arid Marmarica (NW-Egypt/NE-Libya). *Topoi, 21*, 105–146. https://doi.org/10.1515/topoi-2017-0006

Rieger, A.-K. (2017b). The various ways of being mobile: Habitual knowledge, life-strategies and the ancient route networks on the Eastern Marmarica-Plateau (Northern Libyan Desert). *Open Archaeology, 3*(1), 49–68. https://doi.org/10.1515/opar-2017-0003

Rieger, A.-K. (2019). 'Un-central' landscapes of NE-Africa and W-Asia: Landscape archaeology as a tool for socio-economic history in arid landscapes. *Land, 8*, 1.

Rieger, A.-K. (2023). Water as a problem and a solution in arid landscapes: Resilient practices and adapted land use in the Eastern Marmarica (NW-Egypt) between the 2nd millennium BCE and the 1st millennium CE. *Land, 12*(5), 1109. https://doi.org/10.3390/land12051109

Rieger, A.-K., & Möller, H. (2012). Northern Libyan Desert Ware: New thoughts on 'Shell-tempered Ware' and other handmade pottery from the Eastern Marmarica (north-west Egypt). *Libyan Studies, 43*, 11–31.

Rieger, A.-K., Möller, H., Valtin, S., & Vetter, T. (2012). On the route to Siwa: The roadhouse of Abar al Kanayis on the Marmarica-Plateau. *Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Abteilung Kairo, 68*, 135–174.

Rieger, A.-K., Vetter, T., & Möller, H. (2013). The desert dwellers of the Marmarica (Western Desert) as a case study for the Eastern Desert (?). En H. Barnard & W. Wendrich (Eds.), *The History of the Peoples of the Eastern Desert* (pp. 156–173). Cotsen Institute of Archaeology Press.

Ripley, B. D. (1977). Modelling spatial patterns. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 39*(2), 172–212.

Roberts, R. C., Abdul Jabbar, J., Jones, H., Orengo, H. A., Madella, M., & Petrie, C. A. (2021). Paper and pixels: Historic maps as a multifaceted resource. *ICA Abstracts, 3*, 250.

Rodríguez-Corral, J., & Rodríguez-Rellán, C. (2023). In the land of tin men? Warrior stelae, mobility, and interaction in western Iberia during the Late Prehistory. *Archaeological and Anthropological Sciences, 15*(11), 172. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/s12520-023-01870-w

Rodríguez-Rellán, C., Cassen, S., Faustino Carvalho, A., Murillo Barroso, M., & Fábregas Valcarce, R. (2023). Desenredando el caos: Un análisis de la circulación de los adornos de piedra verde durante la prehistoria reciente de la península ibérica a través de la investigación de redes. *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada, 33*, 33–70. https://doi.org/10.30827/cpag.v33i0.28274

Rodríguez-Rellán, C., & Fábregas-Valcarce, R. (2023). Assessing the perceptibility of prehistoric monuments on their landscape: An exploratory approach using agent-based modelling. *Vegueta: Anuario de la Facultad de Geografía e Historia, 23*(1), 115–145.

Romanowska, I., Wren, C. D., & Crabtree, S. A. (2021). *Agent-based modelling for archaeology: Simulating the complexity of society*. The Santa Fe Institute Press.

Ropero, R. F., Maldonado, A. D., Uusitalo, L., Salmerón, A., Rumí, R., & Aguilera, P. A. (2021). A soft clustering approach to detect socio-ecological landscape boundaries using Bayesian networks. *Agronomy, 11*(4), 740. https://doi.org/10.3390/agronomy11040740

Rossignol, J. (1992). Concepts, methods, and theory building: A landscape approach. In J. Rossignol & L. Wandsnider (Eds.), *Space, time, and archaeological landscapes* (pp. 3–16). Springer Science+Business Media.

Rozzi, R., Massardo, F., & Poole, A. (2020). The "3Hs" (Habitats, Habits, Co-in-Habitants) of the biocultural ethic: A "philosophical lens" to address global changes in the Anthropocene. In L. Valera & J. Castilla (Eds.), *Global changes: Ethics of science and technology assessment* (Vol. 46). Springer.

Rubio-Campillo, X. (2017). El papel de la simulación en la arqueología actual. En D. Jiménez-Badillo (Ed.), *Arqueología computacional. Nuevos enfoques para la documentación, análisis y difusión del patrimonio cultural* (pp. 51–58). Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Rubio-Campillo, X., Cela, J. M., & Hernández Cardona, F. X. (2012). "Simulating" archaeologists? Using agent-based modelling to improve battlefield excavations. *Journal of Archaeological Science, 39*, 347–356. https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.09.020

Ruiz Zapatero, G. (1988). La prospección arqueológica en España: Pasado, presente y futuro. *Arqueología Espacial, 12*, 33–47.

Ruiz Zapatero, G., & Burillo Mozota, F. (1988). Metodología para la investigación en arqueología territorial. *Munibe, 6*, 45–64.

Sadler, R. C., Gilliland, J. A., & Arku, G. (2011). An application of the edge effect in measuring accessibility to multiple food retailer types in Southwestern Ontario, Canada. *International Journal of Health Geographics, 10*(34). https://doi.org/10.1186/1476-072X-10-34

Safadi, C., & Sturt, F. (2019). The warped sea of sailing: Maritime topographies of space and time for the Bronze Age eastern Mediterranean. *Journal of*

Archaeological Science, 103, 1–15. Academic Press. https://doi.org/10.1016/j.jas.2019.01.001

Saha, A., Pal, S. C., Santosh, M., Janizadeh, S., Chowdhuri, I., Norouzi, A., Roy, P., & Chakrabortty, R. (2021). Modelling multi-hazard threats to cultural heritage sites and environmental sustainability: The present and future scenarios. *Journal of Cleaner Production, 320*, 128713. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128713

Sanders, I. F. (1976). Settlement in the Hellenistic and Roman periods on the plain of the Mesara, Crete. *Annual of the British School at Athens, 71*, 131–137.

Sanders, I. F. (1982). *Roman Crete: An Archaeological Survey and Gazetteer of Late Hellenistic, Roman and Early Byzantine Crete*. Aris & Phillips.

Sarhan, M. (2013). *The Socioeconomic Assessment for Siwa Oasis, Red Sea, Matrouh in Egypt*. Cairo: United Nations Development Programme.

Sauer, C. O. (1963). The morphology of landscape. In J. Leighly (Ed.), *Land and life: A selection from the writings of Carl Ortwin Sauer* (pp. 315–350). University of California Press.

Scarre, C. (2006). Sound, place and space: Towards an archaeology of acoustics. In C. Scarre & G. Lawson (Eds.), *Archaeoacoustics* (pp. 1–11). Cambridge: McDonald Institute Monographs.

Scheidel, W. (2014). The shape of the Roman world: Modelling imperial connectivity. *Journal of Roman Archaeology, 27*, 7–32. https://doi.org/10.1017/S1047759414001147

Scheidel, W. (2015). *Orbis: The Stanford Geospatial Network Model of the Roman World*. Princeton/Stanford Working Papers in Classics. Disponible en SSRN: https://doi.org/10.2139/ssrn.2609654

Schiffer, M. B. (1987). *Formation processes of the archaeological record*. Albuquerque: University of New Mexico Press.

Schiffer, M. B. (1976). *Behavioral archaeology*. New York: Academic Press.

Schiffer, M. B., Sullivan, A. P., & Klinger, T. C. (1978). The design of archaeological surveys. *World Archaeology, 10*(1), 1–28.

Schlanger, N. (2004). The past is in the present: On the history and archives of archaeology. *Modernism/Modernity, 11*(1), 165–167. https://doi.org/10.1353/mod.2004.0023

Schneider, V. (2024, May 30–31). GIS in Crete: Archaeological questions and computational answers [Conferencia]. National Hellenic Research Foundation, Atenas, Grecia.

Schöpfel, J. (2006). Observations on the future of grey literature. *Grey Journal, 2*(2), 67–76.

Schöpfel, J. (2010). Towards a Prague definition of grey literature. In D. J. Farace & J. Frantzen (Eds.), *Twelfth International Conference on Grey Literature: Transparency in Grey Literature: Grey Tech Approaches to High Tech Issues.*

Prague, 6–7 December 2010, Czech Republic (pp. 11–26). GreyNet, Grey Literature Network Service.

Scutari, M., & Denis, J.-B. (2021). *Bayesian networks: With examples in R* (2nd ed.). New York, NY: Chapman and Hall/CRC.

Shanks, M., & Tilley, C. (1987). *Social theory and archaeology*. University of New Mexico Press.

Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika, 52*(3/4), 591-611. https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591

Shapshay, S., Tenen, L., & Nomikos, A. (2018). Place matters. *The Journal of Aesthetics and Art Criticism, 76*(4), 453–462.

Shaw, J. W. (1978). Kommos: A major prehistoric town in Crete. *Archaeology, 31*(2), 50–52.

Shaw, J. W. (1989). Phoenicians in southern Crete. *American Journal of Archaeology, 93*(2), 165–183.

Shaw, G. J. (2023). *Guerra y comercio con los faraones: Un estudio arqueológico de las relaciones exteriores del antiguo Egipto* (J. M. Parra, Trad.). Editorial Dilema.

Sheldrick, N., & Zerbini, A. (2017). A heritage inventory for documenting endangered archaeology in the Middle East and North Africa. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-2/W2*, 237–241. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-237-2017.

Shennan, S. (1988). *Quantifying archaeology*. Edinburgh, UK: Edinburgh University Press.

Shennan, S., Downey, S. S., Timpson, A., Edinborough, K., Colledge, S., Kerig, T., Manning, K., & Thomas, M. G. (2013). Regional population collapse followed initial agriculture booms in mid-Holocene Europe. *Nature Communications, 4*, 2486. https://doi.org/10.1038/ncomms3486

Sherratt, S. (2003). Bronze Age and early Iron Age Crete. *Antiquity, 77*(298), 858–860.

Sherratt, S. (2010). The Aegean and the wider world: Some thoughts on a world-systems perspective. In W. A. Parkinson & M. L. Galaty (Eds.), *Archaic State Interaction: The Eastern Mediterranean in the Bronze Age* (pp. 81–106). School for Advanced Research Press.

Sherratt, S. (2016). *Ensayos sobre economía e ideología en el Mediterráneo antiguo*. Edicions Bellaterra.

Sherratt, S., & Sherratt, A. (1993). The growth of the Mediterranean economy in the early first millennium BC. *World Archaeology, 24*(3), 361–378.

Sherratt, A. (1997). *Economy and society in prehistoric Europe: Changing perspectives*. Princeton University Press.

Silva, F., & Campion, N. (Eds.). (2015). *Skyscapes: The role and importance of the sky in archaeology*. Oxford: Oxbow Books.

Simpson, F. (2002). Evidence for a Late Bronze Age Libyan presence in the Egyptian fortress at Zawiyet Umm el-Rakham (Tesis doctoral inédita). Universidad de Liverpool.

Sinclair, P., Moen, J., & Crumley, C. (2018). Historical ecology and the longue durée. In C. Crumley, T. Lennartsson, & A. Westin (Eds.), *Issues and concepts in historical ecology: The past and future of landscapes and regions* (pp. 13–40). Cambridge: University Cambridge Press.

Sindbæk, S. M. (2007). The small world of the Vikings: Networks in early medieval communication and exchange. *Norwegian Archaeological Review, 40*(1), 59-74. https://doi.org/10.1080/00293650701327619.

Sissi Archaeological Project. (s.f.). Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://sarpedon.be/

Sjögren, L. (2003). *Cretan Locations: Discerning Site Variations in Iron Age and Archaic Crete (800–500 B.C.)*. Archaeopress. (BAR International Series 1185).

Sjögren, L. (2007). Interpreting Cretan private and communal spaces (800–500 BC). En R. Westgate, N. Fisher, & J. Whitley (Eds.), *Building Communities: House, Settlement and Society in the Aegean and Beyond* (pp. 149–155). British School at Athens. (Studies Vol. 15).

Skeates, R. (2009). *An archaeology of the senses: Prehistoric Malta*. Oxford University Press.

Skellam, J. G. (1948). A probability distribution derived from the binomial distribution by regarding the probability of success as variable between the sets of trials. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 10*(2), 257–261.

Smith, M. E. (Ed.). (2011). *The comparative archaeology of complex societies*. Cambridge University Press.

Smith, K. L. (2005). Looting and the politics of archaeological knowledge in northern Peru. *Ethnos, 70*, 149–170.

Smith, C. (2020). Ethics and best practices for mapping archaeological sites. *Advances in Archaeological Practice, 8*(2), 162–173.

Snape, S. (2000). Imported pottery at Zawiyet Umm el-Rakham. *Bulletin de Liaison du Groupe International d'Etude de la Ceramique Egyptienne, 21*, 17–22.

Snape, S. (2001). Neb-Re and the heart of darkness: The latest discoveries from Zawiyet Umm el-Rakham (Egypt). *Antiquity, 75*(287), 19–20.

Snape, S. (2013). A stroll along the Corniche? Coastal routes between the Nile Delta and Cyrenaica in the Late Bronze Age. En H. Riemer & F. Forster (Eds.), *Desert Road Archaeology in the Eastern Sahara* (pp. 439–454). Cologne: Heinrich-Barth-Institut.

Snape, S. (1998). Walls, wells and wandering merchants: Egyptian control of Marmarica in the Late Bronze Age. En C. J. Eyre (Ed.), *Proceedings of the Seventh International Congress of Egyptologists, Cambridge, 3–9 September 1995* (pp. 1081–1084). Peeters.

Snape, S. (2003). The emergence of Libya on the horizon of Egypt. En D. B. O'Connor & S. Quirke (Eds.), *Mysterious Lands* (pp. 93–106). UCL Press.

Snape, S. (2004). The excavations of the Liverpool University mission to Zawiyet Umm el-Rakham 1994–2001. *Annales du Service des Antiquités de l'Égypte, 78*, 149–160.

Snape, S. (2010). Vor der Kaserne: External supply and self-sufficiency at Zawiyet Umm el-Rakham. En M. Bietak, E. Czerny, & I. Forstner-Müller (Eds.), *Cities and Urbanism in Ancient Egypt: Papers from a Workshop in November 2006 at the Austrian Academy of Sciences* (pp. 271–288). Austrian Academy of Sciences Press.

Snape, S. (2013). A stroll along the Corniche: Coastal routes between the Nile Delta and Cyrenaica in the Late Bronze Age. En F. Förster & H. Riemer (Eds.), *Desert Road Archaeology in Ancient Egypt and Beyond* (pp. 439–454). Heinrich-Barth-Institut.

Snape, S. R. (1998). Walls, wells and wandering merchants: Egyptian control of the Marmarica in the Late Bronze Age. En C. J. Eyre (Ed.), *Proceedings of the Seventh International Congress of Egyptologists, Cambridge, 3–9 September 1995* (pp. 1081–1084). Peeters.

Snape, S. R., & Wilson, P. (2007). *Zawiyet Umm el-Rakham I: The Temple and Chapels*. Rutherford Press.

Snape, S., & Godenho, G. (2007). *Zawiyet Umm el-Rakham II: The Monuments of Nebre*. Rutherford Press.

Snead, J. E., Erickson, C. L., & Darling, J. A. (2011). *Landscapes of movement: Trails, paths, and roads in anthropological perspective*. Philadelphia: University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology.

Snead, J. E., Erickson, C. L., & Darling, J. A. (2011). Making human space: The archaeology of trails, paths, and roads. En J. E. Snead, C. L. Erickson, & J. A. Darling (Eds.), *Landscapes of Movement: Trails, Paths, and Roads in Anthropological Perspective* (pp. 42–67). University of Pennsylvania Press.

Soja, E. W. (1996). *Thirdspace: Journeys to Los Angeles and other real-and-imagined places*. Oxford: Blackwell.

Solnit, R. (2000). *Wanderlust: A History of Walking*. Viking.

Sørensen, T. F. (2017). The Two Cultures and a World Apart: Archaeology and Science at a New Crossroads. *Norwegian Archaeological Review, 50*(2), 101–115. https://doi.org/10.1080/00293652.2017.1367031.

Sperotto, A., Molina, J.-L., Torresan, S., Critto, A., & Marcomini, A. (2017). Reviewing Bayesian networks potentials for climate change impacts assessment and management: A multi-risk perspective. *Journal of Environmental Management, 202*, 320–331. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.044

SRTM 30 Meter DEM. (s.f.). Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://dwtkns.com/srtm30m/

Stančo, L., & Pažout, A. (2020). Which way to Roxane: Mobility networks in the heartland of Central Asia. *Journal of Archaeological Science: Reports, 32*, 102391. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102391

Stein, G. J. (2002). From passive periphery to active agents: Emerging perspectives in the archaeology of interregional interaction. *American Anthropologist, 104*(3), 903–916.

Steward, J. H. (1955). *Theory of culture change: The methodology of multilinear evolution*. Urbana: University of Illinois Press.

Stodden, V., McNutt, M., Bailey, D. H., Deelman, E., Gil, Y., Hanson, B., Heroux, M. A., Ioannidis, J. P. A., & Taufer, M. (2016). Enhancing reproducibility for computational methods. *Science, 354*(6317), 1240. https://doi.org/10.1126/science.aah6168.

Strollo, R. M., D'Auria, S., & De Silla, F. (2017). A multidisciplinary approach to digital archaeology. *Disegnarecon, 10*(19).

Stucchi, S. (1991). Nuovi aspetti della precolonizzazione nella Libya. En D. Musti (Ed.), *La transizione dal Miceneo all'alto arcaismo. Dal palazzo alla città. Atti del convegno internazionale, Roma 14–19 marzo 1988* (pp. 583–586). Roma: Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Tanasi, D. (2020). The digital (within) archaeology: Analysis of a phenomenon. *The Historian, 82*(1), 22–36.

Tapete, D. (2019). Earth observation, remote sensing, and geoscientific ground investigations for archaeological and heritage research. *Geosciences, 9*(4), 161.

Tartaron, T. F. (2003). Archaeological survey: Sampling strategies and field methods. En J. R. Wiseman & K. L. Zachos (Eds.), *Landscape archaeology in Southern Epirus, Greece I* (pp. 23–45). Princeton: American School of Classical Studies at Athens.

Tartaron, T. F. (2013). *Maritime Networks in the Mycenaean World*. Cambridge University Press.

tDAR. (s.f.). *The Digital Archaeological Record*. Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://www.tdar.org/about/

Tello, E. (1999). La formación histórica de los paisajes agrarios mediterráneos: Una aproximación coevolutiva. *Historia Agraria, 19*, 195–212.

Terrell, J. (1977). Human biogeography in the Solomon Islands. *Fieldiana Anthropology, 68*(1), 1–47.

The Khavania Archaeological Project. (s.f.). Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://www.cig-icg.gr/the-khavania-archaeological-project-2022/

The Sphakia Survey. (s.f.). Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de https://www.classics.ox.ac.uk/sphakia-survey

Thiery, F. (2019). Linked open usable data (LOUD) and FAIR data for the research community. En *Sphere 7 Data: Principles for building resilience in research data management*. Zenodo.

Thiery, F. (2019). Sphere 7 data: LOUD and FAIR data for the research community. *Linked Geodesy Working Papers*. https://doi.org/10.5281/zenodo.2643470

Thomas, D. H. (1975). Nonsite sampling in archaeology: Up the creek without a site? En J. W. Mueller (Ed.), *Sampling in archaeology* (pp. 61–81). Tucson: The University of Arizona Press.

Thomas, R. (1991). Drowning in data? Publication and rescue archaeology in the 1990s. *Antiquity, 65*(249), 822–828. https://doi.org/10.1017/S0003598X00080546

Thrift, N. (1996). *Spatial formations*. London: Sage Publications.

Thrift, N. (2005). Beyond mediation: Three new material registers and their consequences. En D. Miller (Ed.), *Materiality* (pp. 141–173). Durham, NC: Duke University Press.

Thrift, N. (2006). Space. *Theory, Culture & Society, 23*(2–3), 139–146.

Thurner, S., Hanel, R., & Klimek, P. (2018). *Introduction to the theory of complex systems*. Oxford University Press.

Tilley, C. (1994). *A phenomenology of landscape: Places, paths, and monuments*. Berg: The University of Michigan.

Tilly, C. (1992). *Coercion, capital, and European states, AD 990–1992*. Blackwell.

Tobalina, L., & González-Pérez, C. (2020). Valoración de la calidad de los datos arqueológicos a través de la gestión de su vaguedad. Aplicación al estudio del poblamiento tardorromano. *Complutum, 31*(2), 343–360.

Tobler, W. (1993). Three presentations on geographical analysis and modeling: Non-isotropic geographic modeling; speculations on the geometry of geography; and global spatial analysis. *Technical Report 93-1*.

Tomlinson, J. E., Rutter, J. B., & Hoffmann, S. M. A. (2010). Mycenaean and Cypriot Late Bronze Age ceramic imports to Kommos: An investigation by neutron activation analysis. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens, 79*(2), 191–231.

Tomlinson, R. F. (1967). An introduction to the geo-information system of the Canada Land Inventory. *Department of Forestry and Rural Development, Government of Canada*.

Topostext. (s.f.). An index of ancient places and texts. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://topostext.org/

Toscano, M. (2021). *Web information systems for research in history, history of arts, and archaeology* (Tesis doctoral). Universidad de Granada.

Toussaint, G. T. (1980). The relative neighbourhood graph of a finite planar set. *Pattern Recognition, 12*(4), 261–268. https://doi.org/10.1016/0031-3203(80)90066-7

Trapero-Fernández, P., & Aragón, E. (2022). Modelling cabotage: Coastal navigation in the western Mediterranean Sea during the Early Iron Age.

Journal of Archaeological Science: Reports, 41, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103270

Trigger, B. G. (1967). Settlement archaeology: Its goals and promise. *American Antiquity, 32*, 149–160.

Trigger, B. G. (1998). *Sociocultural evolution: Calculation and contingency*. Blackwell.

Trigger, B. G. (2003). *Understanding early civilizations: A comparative study*. Cambridge University Press.

Trismegistos. (s.f.). An interdisciplinary portal of papyrological and epigraphical resources. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://www.trismegistos.org/index.php

Turchin, P., Brennan, R., Currie, T., Feeney, K., Francois, P., Hoyer, D., Mullins, D., et al. (2020). Quantitative historical analysis uncovers a single dimension of complexity that structures global variation in human social organization. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 117*(9), 2466–2472.

Turchin, P., Whitehouse, H., François, P., Hoyer, D., Alves, A., Baines, J., Baker, D., Bartkowiak, M., Bates, J., Bennett, J., et al. (2020). An introduction to Seshat: Global history databank. *Journal of Cognitive Historiography, 5*(1–2), 115–123. https://doi.org/10.1558/jch.39395.

Ur, J. (2003). CORONA satellite photography and ancient road networks: A northern Mesopotamian case study. *Antiquity, 77*(295), 102–115. https://doi.org/10.1017/S0003598X00061391.

Ur, J. (2006). Google Earth and archaeology. *SAA Archaeological Record, 6*(3), 35–38.

Ur, J. (2013). Spying on the past: Declassified intelligence satellite photographs and Near Eastern landscapes. *Near Eastern Archaeology, 76*(1), 28–36.

U.S. Geological Survey. (s.f.). *Earth Explorer*. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://earthexplorer.usgs.gov/

Van Dyke, R. M. (2014). Phenomenology in archaeology. En C. Smith (Ed.), *Encyclopedia of global archaeology* (pp. 5909–5917). New York: Springer New York.

VanPool, T. L., & Leonard, R. D. (2011). *Quantitative analysis in archaeology*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.

Vaska, M. (2010). Introducing grey literature. En P. Pejsová (Ed.), *Grey literature repositories* (pp. 11–20). National Technical Library.

Vercoutter, J. (1956). *L'Égypte et le Monde Égéen Préhellénique: Étude Critique des Sources Égyptiennes (du Début de la XVIIIe à la Fin de la XIXe Dynastie)*. Institut Français d'Archéologie Orientale.

Verhagen, P. (2013). On the road to nowhere? Least cost paths, accessibility and the predictive modelling perspective. En F. Contreras, M. Farjas, & F. J. Melero (Eds.), *Proceedings of the 38th Annual Conference on Computer*

Applications and Quantitative Methods in Archaeology, CAA2010 (pp. 383–389). Archaeopress.

Verhagen, P., & Jeneson, K. (2012). A Roman puzzle: Trying to find the Via Belgica with GIS. En A. Chrysanthi, P. Murrieta, & C. Papadopoulos (Eds.), *Thinking beyond the tool: Archaeological computing & the interpretive process* (pp. 123–130). BAR International Series 2344. London.

Verhagen, P., Brughmans, T., Nuninger, L., & Bertoncello, F. (2013). The long and winding road: Combining least cost paths and network analysis techniques for settlement location analysis and predictive modelling. En G. Earl, T. Sly, A. Chrysanthi, P. Murrieta-Flores, C. Papadopoulos, I. Romanowska, & D. Wheatley (Eds.), *Proceedings of Computer Applications and Quantitative Techniques in Archaeology Conference 2012, Southampton* (pp. 357–366). Amsterdam University Press.

Verhagen, P., Nuninger, L., & Groenhuijzen, M. R. (2019). Modelling of pathways and movement networks in archaeology: An overview of current approaches. En P. Verhagen, J. Joyce, & M. R. Groenhuijzen (Eds.), *Finding the Limits of the Limes: Modelling Demography, Economy and Transport on the Edge of the Roman Empire* (pp. 217–249). Springer International Publishing.

Verhoeven, G., & Sevara, C. (2016). Trying to break new ground in aerial archaeology. *Remote Sensing, 8*(11), 918.

Vetter, T. (2001). Die rezente äolische Dynamik an der ägyptischen Nordwestküste. *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, Reihe A, 23*, 79–90.

Vetter, T., & Rieger, A.-K. (2019). Ancient water harvesting in the Old World Dry Belt—Synopsis and outlook. *Journal of Arid Environments, 169*, 42–53. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.103996

Vetter, T., Rieger, A.-K., & Möller, H. (2013). Water, routes and rangelands: Ancient traffic and grazing infrastructure in the Eastern Marmarica (northwestern Egypt). En H. Riemer & F. Förster (Eds.), *Desert Road Archaeology in Ancient Egypt and Beyond* (pp. 455–484). Heinrich-Barth-Institut.

Vetter, T., Rieger, A.-K., & Nicolay, A. (2009). Ancient rainwater harvesting systems in the north-eastern Marmarica (north-western Egypt). *Libyan Studies, 40*, 9–23. https://doi.org/10.1017/S0263718900004489

Vetter, T., Rieger, A.-K., & Nicolay, A. (2014). Disconnected runoff contributing areas: Evidence provided by ancient watershed management systems in arid north-eastern Marmarica (NW-Egypt). *Geomorphology, 212*, 41–57. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.002

VIATOR-e. (s.f.). Recuperado el 1 de noviembre de 2024, de http://viatore.icac.cat/

VICI. (s.f.). An interactive map of ancient history. Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://vici.org/

Vis, B. N. (2018). *Cities made of boundaries: Mapping social life in urban form*. UCL Press.

Vivas Sainz, I. (2013). *Egipto y el Egeo a comienzos de la XVIII Dinastía: Una visión de sus relaciones, antecedentes e influencia iconográfica (2585)*. British Archaeological Reports International Series.

Vidler, A., Ballantyne, A., Calvino, I., & Silverman, K. (2014). Troubles in heterotopia: Occupied spaces: New York and Istanbul to the '68 revolution. Recuperado el 01 de marzo de 2024, de https://www.youtube.com/watch?v=Q_o7oPFAxeg

Vousdoukas, M. I., Clarke, J., Ranasinghe, R., Reimann, L., Khalaf, N., Duong, T. M., Ouweneel, B., et al. (2022). African heritage sites threatened as sea-level rise accelerates. *Nature Climate Change, 12*(3), 256–262. https://doi.org/10.1038/s41558-022-01280-1

Wachsmann, S. (1987). *Aegeans in the Theban Tombs*. *Orientalia Lovaniensia Analecta, 20*. Peeters Publishers.

Wachsmann, S. (1998). *Seagoing Ships and Seamanship in the Bronze Age Levant*. Texas A&M University Press.

Wachsmann, S., Tsoukala, V., Sakellariou, D., Davis, D., Smith, C., Buxton, B., Maroulakis, S., Rousakis, G., Georgiou, P., Hale, J., Hohlfelder, R., Griffin, D., Theodoridou, D., Chrysocheri, E., & Fix, P. (2009). The Danaos Project, 2008: Reconstructing the Crete to Egypt route. In *Proceedings of the 9th Hellenic Symposium on Oceanography and Fisheries* (Vol. 1, pp. 146–151).

Wachsmann, S. A. (2010). The Danaos Project, 2007-2008. *CMAC News and Reports, 2*(1), 6–8.

Wallace, S. (2010). *Ancient Crete: From Successful Collapse to Democracy's Alternatives, Twelfth to Fifth Centuries BC*. Cambridge University Press.

Wallerstein, I. (1974/2004). *The Modern World-System I: Capitalist Agriculture and the Origins of the European World-Economy in the Sixteenth Century*. University of California Press.

Watrous, L. V. (1974). *An archaeological survey of the Lasithi Plain in Crete from the Neolithic to the Late Roman period* (Doctoral dissertation). University of Pennsylvania.

Watrous, L. V. (1985). Late Bronze Age Kommos: Imported pottery as evidence for foreign contact. *Scripta Mediterranea, 6*, 1–10.

Watrous, L. V. (1992). *Kommos III: The Late Bronze Age Pottery*. Princeton University Press.

Watrous, L. V., Hadzi-Vallianou, D., & Blitzer, H. (2004). *The plain of Phaistos: Cycles of social complexity in the Mesara Region of Crete*. Los Angeles: The Cotsen Institute of Archaeology Press.

Watrous, L. V., Haggis, D. C., Nowicki, K., Vogeikoff-Brogan, N., & Schultz, M. (2012). *Archaeological Survey of the Gournia Landscape: A Regional History of the Mirabello Bay, Crete, in Antiquity*. *Prehistory Monographs, 37*. INSTAP Academic Press.

Wescott, K. L., & Brandon, R. J. (1999). *Practical applications of GIS for archaeologists: A predictive modeling kit*. London: Taylor & Francis.

Westley, K., Andreou, G., El Safadi, C., Huigens, H. O., Nikolaus, J., Ortiz-Vazquez, R., Ray, N., Smith, A., Tews, S., Blue, L., & Breen, C. (2021). Climate change and coastal archaeology in the Middle East and North Africa: Assessing past impacts and future threats. *Journal of Island and Coastal Archaeology, 18*(2), 251–283. https://doi.org/10.1080/15564894.2021.1955778.

Westley, K., Nikolaus, J., Emrage, A., Flemming, N., & Cooper, A. (2023). The impact of coastal erosion on the archaeology of the Cyrenaican coast of Eastern Libya. *PLOS ONE, 18*(4), e0283703. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283703.

Wheatley, D. (2000). Spatial technology and archaeological theory revisited. En K. Lockyear, J. T. Sly, & V. Mihailescu-Birliba (Eds.), *CAA'96 - Computer applications and quantitative methods in archaeology* (pp. 123-132). Oxford: Archaeopress.

Wheatley, D., & Gillings, M. (2002). *Spatial technology and archaeology: The archaeological applications of GIS*. London: Routledge.

White, D., & White, A. P. (1996). Coastal sites of Northeast Africa: The case against Bronze Age ports. *Journal of the American Research Center in Egypt, 33*, 11–30.

White, D. A., & Barber, S. B. (2012). Geospatial modeling of pedestrian transportation networks: A case study from Precolumbian Oaxaca, Mexico. *Journal of Archaeological Science, 39*(8), 2684–2696. https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.04.017

White, D. (1986). Excavations on Bates's Island, Marsa Matruh. *Journal of the American Research Center in Egypt, 23*, 51–84. https://doi.org/10.2307/40001090

White, D. (1996). Marsa Matruh: The resurfacing of ancient Paraetonium and its ongoing reburial. En D. M. Bailey (Ed.), *Archaeological Research in Roman Egypt (JRA Supplementary Series, 19)* (pp. 61–81). London: Ann Arbor.

White, D. (2002a). *Marsa Matruh I: The Excavation (Prehistory Monographs, 1).* Philadelphia: INSTAP Academic Press.

White, D. (2002b). *Marsa Matruh II: The Objects.* INSTAP Academic Press.

White, D., & Gardner, R. (2002). Environmental morphology and history of the island and adjacent lagoon area. En D. White (Ed.), *Marsa Matruh I: The Excavation* (pp. 23–34). Philadelphia: INSTAP Academic Press.

Whiting, M. (2013). *Travel in the late antique Levant: A study of networks of communication and travel infrastructure in the 4th-7th centuries* [Tesis doctoral, University of Oxford].

Whitley, J., Prent, M., & Thorne, S. (1999). Praisos IV: A Preliminary Report on the 1993 and 1994 Survey Seasons. *Annual of the British School at Athens, 94*, 215–264. https://doi.org/10.1017/S0068245400000587

Wilford, J. (2008). Out of rubble: Natural disaster and the materiality of the house. *Environment and Planning D: Society and Space, 26*(4), 647–662.

Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., da Silva Santos, L. B., et al. (2016). The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data, 3,* 160018. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18.

Wilson, A. (2012). Saharan trade in the Roman period: Short-, medium- and long-distance trade networks. *Azania: Archaeological Research in Africa, 47*(4), 409–449. https://doi.org/10.1080/0067270X.2012.727614.

Wilson, A. (2021). The use of remote sensing and digital tools for cultural heritage management and archaeological research. *Levant, 53*(3), 384–388.

Wilson, G., Aruliah, D. A., Brown, C. T., Chue Hong, N. P., Davis, M., Guy, R. T., Haddock, S. H. D., Huff, K. D., Mitchell, I. M., Plumbley, M. D., Waugh, B., White, E. P., *&* Wilson, P. (2014). Best practices for scientific computing. *PLoS Biology, 12*(1), e1001745. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001745

Wilson, A., *&* Edwards, B. (Eds.). (2015). *Open source archaeology.* Walter de Gruyter.

Winterhalder, B. P. (1994). Concepts in historical ecology: The view from evolutionary theory. En C. L. Crumley (Ed.), *Historical ecology. Cultural knowledge and changing landscapes* (pp. 17–42). Santa Fe, New Mexico, USA: School of American Research Advanced Press.

Worlddata. (s.f.). *World statistics and data.* Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://www.worlddata.info/

Wright, H., *&* Richards, J. D. (2018). Reflections on collaborative archaeology and large-scale online research infrastructures. *Journal of Field Archaeology, 43*(1), 60–67. https://doi.org/10.1080/00934690.2018.1511960.

Zenodo. (s.f.) Recuperado el 8 de agosto de 2024, de https://zenodo.org/

Zerbini, A. (2018). Developing a heritage database for the Middle East and North Africa. *Journal of Field Archaeology, 43*(sup1), S9–S18. https://doi.org/10.1080/00934690.2018.1514722.

Zwitter, A. (2014). Big data ethics. *Big Data & Society, 1*(2), 1–6. https://doi.org/10.1177/2053951714559253

Ediciones de textos y fuentes clásicas citadas

Anónimo. (1929). *Itineraria Antonini Augusti et Burdigalense* (O. Cuntz, Ed.). Lipsiae: B. G. Teubneri.

Arriano. (1897). *Historia de las expediciones de Alejandro* (F. Baráibar y Zumárraga, Trad.). Madrid: Biblioteca Clásica de Luis Navarro.

Estrabón. (2016a). *Geografía. Libros VIII-X* (M. A. L. Rey, Trad.). Madrid: Editorial Gredos.

Estrabón. (2016b). *Geografía. Libros XV-XVII* (M. A. L. Rey, Trad.). Madrid: Editorial Gredos.

Heródoto. (2007). *The Landmark Herodotus: The Histories* (R. B. Strassler, Ed.; A. L. Purvis, Trans.). Nueva York: Pantheon Books.

Plinio el Viejo. (1997). *Historia Natural. Libros III–VI* (J. M. Requejo, Trad.). Madrid: Editorial Gredos.

Ptolomeo. (2013). *Geografía de Claudio Ptolomeo* (T. Calvo, Trad.). Madrid: Editorial Gredos.

Rathmann, M. (2017). *Tabula Peutingeriana: Die einzige Weltkarte aus der Antike*. Darmstadt: Philipp von Zabern Verlag.

Strabo. (s.f.). *Geography* (H. L. Jones, Trans.). Recuperado el 8 de agosto de 2024, de http://data.perseus.org/texts/urn:cts:greekLit:tlg0099.tlg001

La tesis doctoral que aquí se presenta tiene su origen en el proyecto PERAIA: *Landscapes, Networks, and Society along the Ancient Libyan Sea*, una iniciativa cuyo objetivo es comprender, desde una perspectiva comparativa, multiescalar y diacrónica (*longue durée*), las complejas interacciones entre paisajes, redes y estructuras sociales en las regiones del Egeo (Creta) y el noreste del África mediterránea (Marmárica). Esta investigación ha sido respaldada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España (FPU17/06503) y el Vicerrectorado de Investigación y Transferencia de la Universidad de Granada (Ref.: PPJIB2020.18). Este apoyo ha permitido llevar a cabo un examen exhaustivo de la evidencia arqueológica, las redes históricas y las condiciones geográficas y ambientales que dieron forma a estas regiones y sociedades, cuyos resultados se exponen en el presente trabajo.

PERAIA