

UNIVERSIDAD DE GRANADA



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIUDAD, TERRITORIO Y PLANIFICACIÓN
SOSTENIBLE

TESIS DOCTORAL

**Aplicación del análisis pedoantracológico para la
reconstrucción del área de distribución del paleoendemismo
*Abies pinsapo***

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR PRESENTADA POR:

Rubén Pardo Martínez

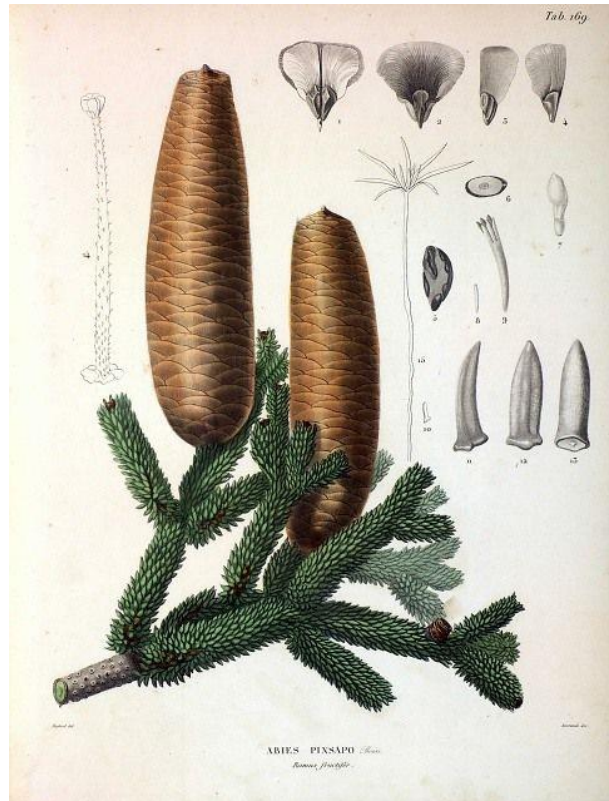
Directores:

Dr. José Gómez Zotano

Dr. José Antonio Olmedo Cobo

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Rubén Pardo Martínez
ISBN: 978-84-1195-099-2
URI: <https://hdl.handle.net/10481/85724>

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS PEDOANTRACOLÓGICO PARA LA RECONSTRUCCIÓN DEL ÁREA DE DISTRIBUCIÓN DEL PALEOENDEMISMO *ABIES* *PINSAPO*



Rubén Pardo Martínez

Tesis doctoral presentada por compendio de publicaciones

UNIVERSIDAD DE GRANADA

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

Dirigida por:

Dr. José Gómez Zotano

Dr. José Antonio Olmedo Cobo



GRANADA 2023

Portada:

Lámina original del libro de Boissier "Voyage Botanique dans le Midi de l'Espagne pendant l'année 1837". Dibujo de las ramas fructíferas y escamas seminales.

Portadas de los diferentes bloques:

Resumen. Fotografía de Francisco Vázquez.

Bloque I. Fotografía de Rafael Galán.

Bloque II. Fotografía de Eduardo Nave.

Bloque III. Fotografía de Francisco Portillo.

Bloque IV. Fotografía de Francisco Portillo.

El doctorando / The *doctoral candidate* **Rubén Pardo Martínez** y los directores de la tesis /
and the thesis supervisor/s: **José Gómez Zotano y José Antonio Olmedo Cobo**

Garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando
bajo la dirección de los directores de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza,
en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados,
cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

*Guarantee, by signing this doctoral thesis, that the work has been done by the doctoral
candidate under the direction of the thesis supervisor/s and, as far as our knowledge
reaches, in the performance of the work, the rights of other authors to be cited (when their
results or publications have been used) have been respected.*

Lugar y fecha / Place and date:

Granada, a 8 de septiembre de 2023

Director/es de la Tesis / *Thesis supervisor/s;* Doctorando / *Doctoral candidate:*

Firmado por GOMEZ ZOTANO
JOSE -
11/09/2023 con un
certificado emitido por AC

Firmado por OLMEDO COBO
JOSE ANTONIO -
día 12/09/2023 con un certificado
emitido por AC FNMT Usuarios

Firmado
electrónicamente
por Rubén Pardo
Martínez el
08/09/2023

Firma / Signed

Firma / Signed

D. José Gómez Zotano, Catedrático de Universidad del Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía de la Universidad de Granada, informa favorablemente de la idoneidad para la presentación de la tesis realizada por el doctorando Rubén Pardo Martínez bajo la modalidad de agrupación de publicaciones, cumpliendo con el artículo 18.4 de las Normas Reguladoras de las Enseñanzas Oficiales de Doctorado y del Título de Doctor por la Universidadde Granada, el cual establece que:

“Una tesis doctoral puede también consistir en el reagrupamiento en una memoria de trabajos de investigación publicados por el doctorando en medios científicos relevantes en su ámbito de conocimiento. Los artículos que configuren la tesis doctoral deberán estar publicados o aceptados con fecha posterior a la obtención del título de grado y máster, no podrán haber sidoutilizados en ninguna tesis anterior. Si la publicación ha sido realizada por varios autores, además del doctorando, se debe adjuntar la declaración de los restantes autores de no haber presentadodicha publicación en otra tesis doctoral o la renuncia a hacerlo. En esta modalidad, la tesis debetener además de los apartados mencionados en el punto anterior [Art. 18.3.- La tesis debe contar, al menos, con los siguientes contenidos: título, resumen, introducción, objetivos, metodología, resultados, conclusiones y bibliografía.], los artículos que la componen, bien integrados como capítulos de la tesis o bien como un Anexo.”

Y para que así conste y surta los efectos oportunos, firmo la presente en Granada, a 11 de septiembre de 2023.

Firmado por GOMEZ
ZOTANO JOSE -

11/09/2023 con un
certificado emitido por
AC FNMT Usuarios

A mis padres, Encarni y Benigno

A mi hermano, Daniel

A Paqui

Aunque supiera que mañana se acaba el mundo, hoy mismo plantaría un árbol.

MARTIN LUTHER KING

El que nos encontremos tan a gusto en plena naturaleza obedece a que ésta no tiene opinión sobre nosotros.

FRIEDRICH NIETZSCHE

Para nosotros 100 años es una vida, para la naturaleza es un grano de arena.

ANÓNIMO

Estudiar el pasado puede definir el futuro.

CONFUCIO

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría comenzar agradeciendo a mis directores de tesis, los doctores José Gómez Zotano y José Antonio Olmedo Cobo, por brindarme la oportunidad de embarcarme en este ambicioso y, a la par, gratificante proyecto. Aterrizar en la vida académica no fue fácil. Sin embargo, desde el primer momento me he sentido arropado, querido y escuchado, recibiendo toda la ayuda necesaria –y más– para poder avanzar con paso firme en el mundo de la investigación y docencia universitaria. Para una persona totalmente neófito como yo en dichos ámbitos, la labor de tutorización de ambos directores ha resultado imprescindible. Sin ellos, el proyecto de tesis doctoral que hoy, por fin, ve la luz, no hubiese sido posible.

También me gustaría aprovechar estas líneas para agradecer al conjunto de profesores del Grado en Geografía y Gestión del Territorio de la Universidad de Granada su predisposición y ayuda desinteresada. Indudablemente, ellos son partícipes directos de mi evolución como docente e investigador. Primero, porque durante 4 años pude empaparme de su conocimiento, el cual a la postre sentaría las bases de mi formación como geógrafo. Segundo, porque durante mi etapa de doctorado he seguido recibiendo constantes muestras de apoyo y cariño, algo que sin duda me ha alentado a seguir trabajando por y para mi futuro, y por y para la Geografía, disciplina con la que estaré siempre en deuda. Por todo ello, mi más sincero agradecimiento al profesorado en activo y jubilado del Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física: Jonatan Arias García, Andrés Caballero Calvo, María Teresa Camacho Olmedo, Jesús Fernández Gálvez, Marina Frolova Ignatieva, Juan Garrido Clavero, Rafael Hernández del Águila, Yolanda Jiménez Olivencia, Rafael Machado Santiago, María Elena Martín-Vivaldi Caballero, María José Martos Martín, Manuel Pezzi Cereto, Jesús Rodrigo Comino, Miguel Ángel Sánchez del Árbol y Francisco Villegas Molina; así como a los compañeros del Departamento de Geografía Humana: José Antonio Cañete Pérez, Alberto Capote Lama, Aron Cohen Amselem, Eugenio Cejudo García, Carmen Egea Arias, Juan Jesús Lara Valle, Juan Carlos Maroto Martos, Francisco Navarro Valverde, Belén Pérez Pérez, Laura Porcel Rodríguez, Luis Miguel Sánchez Escolano, José Luis Serrano Montes, Francisco Javier Toro Sánchez y María Eugenia Urdiales Viedma.

No quería dejar pasar la oportunidad de agradecer personalmente al Dr. Emilio Martínez Ibarra la confianza depositada en mí a la hora de tutorizar el que fue mi primer trabajo de investigación *sensu stricto*. Hablo, evidentemente, del Trabajo Fin de Grado, un estudio que, sin saberlo, se acabaría convirtiendo en mi primera publicación en una revista científica de impacto y al que, lógicamente, guardo un cariño especial.

A la Dra. Aída Pinos Navarrete, trabajadora incansable y luchadora nata que siempre ha tenido a bien ayudarme en todo aquello que he podido necesitar. Y no solo eso, sino que en todo momento lo ha hecho con una sonrisa y un excelente trato humano.

A Enrique Fernández Seguí, Responsable de Negociado del Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, quien en no pocas ocasiones me ha sacado de algún que otro apuro burocrático. Sin duda, tanto su eficiencia como su sentido del humor han sido claves para que mi proyecto de tesis doctoral haya podido prosperar satisfactoriamente.

Gracias también a mis compañeros y compañeras de doctorado: Helios Escalante Moreno, Javier Liñán Chacón, Francisco Javier Rodríguez Segura y Noelia Ruíz Moya, un grupo de jóvenes unidos por un denominador común y con los que, aunque no todos los que me hubiera gustado, he compartido muy buenos momentos.

Por otro lado, me gustaría dedicar un agradecimiento muy especial a la Dra. Raquel Cunil Artigas, de la Universidad Autónoma de Barcelona, quien posibilitó mi formación en materia de pedoantracología, una disciplina que hasta hace pocos años era una total desconocida para mí. Asimismo, hago extensible este agradecimiento al resto de miembros del Grup de Recerca en Àrees de Muntanya i Paisatge (GRAMP) de dicha universidad, quienes durante mis visitas a la ciudad condal me hicieron sentir como en casa.

A todo el personal de la cafetería de la Facultad de Filosofía y Letras, especialmente a Dani, Javi, Jesús y Ernesto, profesionales hosteleros en mayúsculas con los que he pasado muy buenos momentos.

Para crecer profesional y personalmente hay que rodearse de los mejores, y es lo que he tratado de hacer. Es por ello que en este apartado quiero hacer un reconocimiento especial al Dr. Francisco Martínez Sevilla, mentor, compañero de fatigas y amigo desde hace muchos años y a quien tengo un gran aprecio.

Por supuesto, también agradezco a todos los estudiantes a los que he podido impartir clases durante estos últimos años. Sus inquietudes y ganas de aprender me han aportado un sinfín de cosas buenas. Desde aquí les doy las gracias y les deseo lo mejor en su futuro profesional.

Gracias a Paqui, compañera de vida desde hace casi 10 años, por su apoyo, amor y confianza.

Por último, y no menos importante, mi agradecimiento más sentido va para las personas que me dieron la vida: mis padres. Su apoyo incondicional, cariño, entrega y sacrificio son los responsables de que hoy, tras cuatro años de duro trabajo y sentimientos encontrados, pueda ver finalizado mi proyecto de tesis doctoral. También a mi hermano, Daniel, uno de los pilares de mi vida desde hace más de 27 años y a quien admiro y quiero profundamente, aunque estas cosas un hermano mayor no las diga muy a menudo. Y a toda mi familia, tanto los presentes como los que lamentablemente ya no están, especialmente a mis abuelos, personas que en algún momento de mi vida han hecho de maestros, padres, amigos y consejeros, una labor multifacética que siempre han sabido desempeñar con una ternura y un querer irrepetibles.

A todos y a todas, MUCHAS GRACIAS.

ÍNDICE GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

RESUMEN..... 20

ABSTRACT..... 22

BLOQUE I. ESTADO DEL ARTE, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1. ESTADO DEL ARTE..... 25

2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN, HIPÓTESIS DE PARTIDA Y OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS..... 34

3. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN..... 38

4. PUBLICACIONES Y ACTIVIDADES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN..... 40

BLOQUE II. MARCO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO

5. MARCO CONCEPTUAL..... 50

6. AMBITO DE ESTUDIO: DELIMITACIÓN ESPACIOTEMPORAL..... 60

7. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN..... 69

BLOQUE III. RESULTADOS

8. LA PEDOANTRACOLOGÍA EN ESPAÑA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... 75

9. PRIMEROS DATOS SOBRE LA COMPOSICIÓN HOLOCENA DE LOS BOSQUES DE MONTAÑA EN EL PARQUE NATURAL DE LA SIERRA DE LAS NIEVES (SERRANÍA DE RONDA) A PARTIR DEL ANÁLISIS PEDOANTRACOLÓGICO..... 100

10. THE HISTORY OF *ABIES PINSAPO* DURING THE HOLOCENE IN SOUTHERN SPAIN, BASED ON PEDOANTHRAOLOGICAL ANALYSIS..... 140

11. PALEOPOPULATIONS AND ECOLOGICAL CONNECTIVITY IN THE NATURA 2000 NETWORK: PROPOSAL FOR THE SERPENTINE-SOIL SPANISH FIRS OF SIERRA BERMEJA (SERRANÍA DE RONDA)..... 166

12. EUROPE'S SOUTHERNMOST INTERGLACIAL REFUGIA AS SENTINELS FOR THE LOCAL EXTINCTION OF MOUNTAIN CONIFERS..... 192

13. MULTIPROXY ANALYSIS FOR THE PALEOBIOGEOGRAPHICAL RECONSTRUCTION OF THE RELICT FORESTS OF THE SERRANÍA DE RONDA DURING THE HOLOCENE (BAETIC SYSTEM, SPAIN)..... 217

14. APROXIMACIÓN PALEOBIOGEOGRÁFICA A LA SIERRA DEL TABLÓN (SERRANÍA DE RONDA, ESPAÑA)..... 248

15. *ABIES PINSAPO* E INCENDIOS FORESTALES: UNA LARGA HISTORIA DE SUPERVIVENCIA A EVENTOS EXTREMOS EN SIERRA BERMEJA (SO CORDILLERA BÉTICA)..... 268

BLOQUE IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

16. DISCUSIÓN GENERAL..... 293

17. CONCLUSIONES GENERALES.....	306
GENERAL CONCLUSIONS.....	309
BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES CONSULTADAS.....	314
ÍNDICE DE FIGURAS.....	333
ÍNDICE DE TABLAS.....	339

RESUMEN

ABSTRACT



RESUMEN

El pinsapo (*Abies pinsapo* Clemente ex Boiss.), es un abeto endémico de la Serranía de Ronda, por lo que se considera que esta especie arbórea es de gran singularidad y valor ecológico en la península ibérica. La excepcionalidad ecológica de esta conífera sería reconocida inicialmente por Simón de Rojas Clemente y Rubio en 1818, siendo difundida posteriormente por Edmond Boissier durante los años 30 del siglo XIX.

La reducida distribución espacial del pinsapo en la actualidad, confinado en tres núcleos montañosos disyuntos de la Serranía de Ronda, así como sus exigentes demandas ambientales, hacen que este abeto mediterráneo sea altamente sensible a cualquier amenaza, situación que le ha llevado a ser catalogado como especie amenazada en peligro de extinción. Diferentes figuras de protección, entre las que se incluyen el Parque Nacional y Natural de la Sierra de las Nieves, el Parque Natural de la Sierra de Grazalema o el Paraje Natural de los Reales de Sierra Bermeja, junto a las numerosas Zonas de Especial Conservación (ZEC) presentes en este territorio, ayudan a salvaguardar este extraordinario vestigio natural. Asimismo, sus bosques quedan integrados en el marco de la Red Ecológica Europea NATURA 2000, a través de la declaración de dichas formaciones arbóreas como “hábitat de interés comunitario” (9520 Abetales de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss.) a partir de la Directiva 92/43/CEE. En esta línea, desde los últimos años vienen desarrollándose diferentes programas y proyectos destinados tanto a combatir las principales amenazas que afectan a este abeto, como a favorecer su conservación, recuperación y sostenibilidad, entre las que destacan el I y II Plan de Recuperación del Pinsapo, desarrollados por la Junta de Andalucía, o diversas actuaciones incluidas dentro de la Estrategia Andaluza de Gestión Integrada de la Biodiversidad.

Hasta la fecha, estas acciones han quedado justificadas de acuerdo con diferentes fuentes de naturaleza imprecisa, como los modelos de distribución de especies (MDE), los estudios de los hábitats actuales o las fuentes históricas.

Las aportaciones derivadas de las citadas fuentes son bastante profusas. Sin embargo, la paleobiogeografía del pinsapo continúa manifestando numerosas lagunas científicas. Todo ello a pesar de que el estudio sobre la distribución de las especies, así como las relaciones de éstas con el ambiente en el que se desarrollan, pasa ineludiblemente por conocer su evolución histórica. Resulta fundamental interpretar toda aquella información de carácter paleoecológico, ya que su lectura puede proporcionar muchas de las claves que permitan comprender la distribución presente de determinados taxones vegetales. Más aún cuando se trata de especies relictas como el pinsapo, único abeto mediterráneo ibérico que ha resistido durante siglos una serie de perturbaciones en forma de incendios, plagas, actuaciones antrópicas o, más recientemente, las adversas condiciones ambientales derivadas del cambio climático. En consecuencia, resulta necesario implementar metodologías científicas contrastadas que

permitan llevar a cabo reconstrucciones paleobiogeográficas precisas y de amplio espectro temporal.

Bajo esta consideración, la hipótesis de partida parte de la existencia de un área de distribución teórica de los bosques de *A. pinsapo* más extensa y continua que la actual en la Cordillera Bética occidental en el pasado. Para corroborar dicha afirmación, esta investigación utiliza el análisis pedoantracológico como base metodológica principal. Concretamente, se han efectuado 35 muestreos pedológicos en diferentes localizaciones de la Serranía de Ronda, coincidiendo con aquellos enclaves potenciales que pudieron albergar *A. pinsapo* en el pasado.

Los resultados, tras el análisis taxonómico de 4126 fragmentos de madera carbonizada y la datación radiocarbónica de 77 muestras, con cronologías que abarcan desde 14 013-13 440 años cal BP (cal: edad calibrada; BP: *before present*) hasta la actualidad, han confirmado la existencia del género *Abies* en varias localizaciones en las que actualmente este taxón no está presente. Concretamente, se ha encontrado carbón de pinsapo en relieves montañosos situados entre los tres núcleos actuales del pinsapar, como Sierra Palmitera y la Sierra del Oreganal, evidenciando su conexión desde un punto de vista paleobiogeográfico.

Análogamente al objetivo principal del presente proyecto de tesis, el elevado volumen de muestras analizadas ha proporcionado información complementaria, aunque de gran importancia paleobiogeográfica, sobre otros taxones arbóreos singulares, como *Pinus* tipo *nigra/sylvestris*, ausente actualmente en la Serranía de Ronda, y que confirmaría el papel que determinados relieves montañosos rondeños habrían desempeñado como refugios postglaciales.

Los resultados avalan, una vez más, la utilidad de los estudios paleobiogeográficos. La información derivada de los mismos, integrada de forma coherente con la del resto de fuentes disponibles, puede ser un recurso de gran validez para el desarrollo de acciones que tengan como objetivo la conservación de aquellas masas forestales que presenten mayor vulnerabilidad frente al cambio climático. En el caso de la presente investigación, este carácter aplicado se ha concretado en la propuesta de un corredor ecológico en Sierra Bermeja, así como en una serie de tareas de repoblación de pinsapo proyectadas en varias localizaciones de la Serranía de Ronda.

Sin embargo, y a pesar de los importantes avances realizados, la presente investigación constituye una primera aproximación a la distribución pretérita de *A. pinsapo*. Por tanto, la línea de trabajo futuro pasa por seguir obteniendo información de carácter paleobiogeográfico que permita conocer con mayor nivel de detalle la distribución y dinámica experimentada por este abeto, así como de las diferentes perturbaciones que mermaron su mayor extensión en el pasado a su localización actual. Para tal fin es esencial ampliar la red de muestreos pedoantracológicos al conjunto de la Cordillera Bética.

ABSTRACT

The Spanish fir (*Abies pinsapo* Clemente ex Boiss.) is an endemic fir of the Serranía de Ronda, so it is considered that this tree species is of great singularity and ecological value in the Iberian Peninsula. The ecological exceptionality of this conifer was initially recognised by Simón de Rojas Clemente y Rubio in 1818, and was later disseminated by Edmond Boissier in the 1930s.

The reduced spatial distribution of the Spanish fir at present, confined to three disjunct mountainous areas of the Serranía de Ronda, as well as its demanding environmental requirements, make this Mediterranean fir highly vulnerable to any threat, a situation that has led it to be catalogued as an endangered species in danger of extinction. Various protected areas, including the Sierra de las Nieves Natural and National Park, the Sierra de Grazalema Natural Park and Los Reales de Sierra Bermeja Natural Site, together with the numerous Special Areas of Conservation (SAC) present in this territory, help to safeguard this extraordinary relict tree. Likewise, its forests are integrated into the framework of the European Ecological Network NATURA 2000, through the declaration of these forests as "habitat of Community interest" (9520 *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss.) from Directive 92/43/EEC. Along these lines, in recent years various programmes and projects have been developed to combat the main threats affecting this fir tree and to promote its conservation, recovery and sustainability, including the *I y II Plan de Recuperación del Pinsapo*, both developed by the Andalusian Regional Government, and various actions included in the *Estrategia Andaluza de Gestión Integrada de la Biodiversidad*.

To date, these actions have been justified according to different sources of an imprecise nature, such as species distribution models (SDM), studies of current habitats or historical sources.

The contributions derived from the aforementioned sources are relatively abundant. However, the paleobiogeography of the Spanish fir continues to show numerous scientific gaps. This is despite the fact that the study of the distribution of the species, as well as their relationships with the environment in which they develop, inevitably requires knowledge of their historical evolution. It is essential to interpret all the information of a paleoecological nature, as reading it can provide many of the keys that help us to understand the present distribution of certain plant taxa. Even more so when dealing with relict species such as the Spanish fir, the only Iberian Mediterranean fir that has withstood for centuries a series of disturbances in the form of fires, pests, anthropic actions or, more recently, the adverse environmental conditions resulting from climate change. Consequently, it is necessary to implement proven scientific methodologies that allow us to carry out precise paleobiogeographical reconstructions over a broad temporal scale.

In view of this consideration, the starting hypothesis is based on the existence of a theoretical area of distribution of Spanish fir forests that was more extensive and continuous than the present one in the western Baetic Cordillera in the past. To corroborate this assertion, in this research pedoanthracological analysis is used as the main methodological basis. Specifically,

35 pedological samples were taken at different locations in the Serranía de Ronda, coinciding with those potential enclaves where *A. pinsapo* may have been present in the past.

The results, after the taxonomic analysis of 4126 charcoal fragments and the radiocarbon dating of a total of 77 samples, with chronologies ranging from 14 013-13 440 cal BP (cal: calibrated age; BP: before present) to the present day, have confirmed the existence of the genus *Abies* in several locations where this taxon is not currently present. Specifically, Spanish fir charcoal has been found in mountainous reliefs located between the three current populations of the Spanish fir, demonstrating their connection from a paleobiogeographical point of view.

Together with the main objective of this thesis project, the large volume of samples analysed has provided complementary information, although of great paleobiogeographical importance, on other singular tree taxa, such as *Pinus nigra/sylvestries* type, which is currently absent in the Serranía de Ronda, confirming the role that certain mountainous reliefs of the Serranía de Ronda have played as postglacial refuges.

The results confirm, once again, how useful the paleobiogeographical approaches are. The information derived from these studies, integrated in a coherent way with that of all other available sources, can be a highly valid resource for the development of actions aimed at the conservation of those forest that are most vulnerable to climate change. In the case of the present research, this applied character has been specified in the proposal for an ecological corridor in Sierra Bermeja, as well as in different reforestation tasks of Spanish firs planned in various locations of the Serranía de Ronda.

However, and despite the significant progress made, the present research constitutes a first approach to the past distribution of *A. pinsapo*; the line of future work involves continuing to obtain paleobiogeographical information that will allow us to know in greater detail the distribution and dynamics experienced by the Spanish firs, as well as the different disturbances that reduced its greater extent in the past to its current distribution. To this end, it is imperative to extend the pedoanthracological sampling network to the whole of the Baetic System.

BLOQUE I

ESTADO DEL ARTE, JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN



1. ESTADO DEL ARTE

1.1. La pedoantracología en los estudios paleoecológicos

Diferentes factores a escala regional, representados fundamentalmente por el clima, así como aquellos de carácter local, entre los que se incluyen factores geomorfológicos, hidrológicos y edáficos, ayudan a explicar la distribución de los organismos vegetales (Nogués, 2003). De igual modo, la importancia de determinados acontecimientos pretéritos, especialmente de tipo geológico o climático, ha sido determinante, de tal forma que la distribución actual de muchas especies no puede ser comprendida sin atender a la perspectiva temporal. A todo ello se suman las actividades humanas, que en muchos casos han constituido un factor clave en la dinámica de determinados ecosistemas (Lefèvre, 2004). Esta incidencia antrópica sobre el paisaje vegetal se intensificó notablemente tras el Último Máximo Glacial (Bodí et al., 2012), momento en el que el clima se volvió progresivamente más cálido (Jalut et al., 2000). Este constatado cambio climático favoreció la transformación de una sociedad eminentemente nómada (como era la del Paleolítico) a una sedentaria (la del Neolítico), que encontró en la agricultura una solución muy eficaz para su supervivencia (Zapata, 2012).

Este importante cambio socio-ambiental supuso la transformación de muchas áreas fértiles del planeta, siendo la cuenca mediterránea una de las más afectadas (Naveh, 1975, 1991). Ganar terreno a las zonas arboladas se convirtió en una tarea prioritaria, tanto para el desarrollo de sistemas agrícolas primigenios como para la creación de zonas de pasto para el ganado (Boticario, 2011). Dentro de estas complejas interacciones entre el ser humano y el medio biótico, el fuego se convierte en una herramienta fundamental para la gestión de los territorios neolítico y postneolítico (Naveh, 1975). Su importancia, constatada en el arco circummediterráneo (Vanniere et al., 2011), también ha sido muy significativa en el sur peninsular (Carrión, 2012, 2022), una región que, por diversos motivos, constituye además un enclave privilegiado para abordar aproximaciones paleoecológicas de distinta índole. En primer lugar, porque se trata de un territorio fuertemente humanizado desde tiempos pretéritos, cuya presencia humana se remonta a 1.6-1.4 millones de años (Ma), tal y como revelan los numerosos hallazgos arqueológicos del yacimiento de Venta Micena (Orce, Granada) (Martínez-Navarro, 1993). Concretamente, el descubrimiento en 1982 de un fragmento de cráneo atribuido al género *Homo*, junto a la identificación en 2002 de un diente de leche perteneciente también al mismo género, convierten a estos restos fósiles en los más antiguos de Europa occidental (Toro-Moyano et al., 2013). Durante este periodo el fuego pudo haber sido una herramienta utilizada para facilitar aquellas actividades básicas de supervivencia, como la caza y la recolección de vegetales (Pausas, 2004), constatando la dilatada e intensa relación entre el ser humano y su medio desde hace cientos de miles de años (Figura 1). En segundo término, por la propia singularidad del ecosistema mediterráneo, caracterizado por tener un clima que se sitúa entre el régimen templado oceánico y el tropical desértico. Su mayor particularidad es la existencia de un periodo de sequedad estival, que además coincide

con la época más cálida del año (Lionello et al., 2006). Bajo el dominio de las altas presiones en verano, con ausencia casi total de precipitaciones, la agostada vegetación se convierte en un combustible altamente inflamable. Ello convierte a la región mediterránea en un espacio especialmente susceptible a los incendios forestales, tal y como atestigua la gran riqueza de carbones sedimentarios en numerosos registros fósiles de la península ibérica (ver Carrión, 2012, 2022). Episodios de fuego que, mucho antes de la presencia del ser humano, ya se manifestaban en el territorio de forma natural, bien fuese porque la cubierta vegetal fuera alcanzada por un rayo o como consecuencia de las numerosas erupciones volcánicas (Naveh, 1975). De hecho, el fuego ha sido uno de los principales agentes modeladores del paisaje vegetal a lo largo de la historia, siendo un elemento clave para explicar la gran diversidad de especies del clima mediterráneo (Carracedo-Martín et al., 2017; Rundel et al., 2018).

Figura 1. Izquierda: réplica del fragmento de cráneo VM-0, llamado Hombre de Orce, atribuido al género *Homo*. Derecha: diente de leche hallado en el yacimiento de Barranco León (Orce). Pertenece al género *Homo* y su antigüedad se ha establecido en 1.4 Ma, convirtiéndolo en el resto fósil más antiguo de toda Europa occidental.



Fuente: Museo de Prehistoria y Paleontología de Orce.

Esta intensa actividad incendiaria generaría multitud de residuos, clasificándose estos en gaseosos y en sólidos. El carbón, cuya génesis puede responder tanto a una mala combustión como a su transformación de forma voluntaria, es el máximo representante de los residuos incluidos en el segundo grupo (Cunill, 2010).

Los carbones pueden preservarse tanto en contextos arqueológicos como en suelos naturales. Respecto a los primeros, es la antracología la encargada de su estudio, siendo Unger (1846) quien primero llevase a cabo un ensayo de este tipo. En este caso, se trata de depósitos en los que la acción del ser humano ha desempeñado un papel esencial a la hora de configurar estos registros paleoecológicos (Uzquiano, 1997). Por su parte, los segundos –carbones no arqueológicos presentes en suelos naturales– son analizados por la pedoantracología (Thinon, 1992) (Figura 2). En estos, las muestras carbonizadas no se conservan como registros que presentan una cronoestratigrafía secuenciada, condición que sí se cumple en los depósitos estudiados por la antracología. Esta circunstancia obliga a datar de forma individualizada cada uno de los fragmentos de carbón que pudiesen ser de interés para la investigación (Thinon, 1992; Cunill, 2010).

Figura 2. Muestra de carbón preservada en la cata de Arroyo de los Lobos 2.



Fuente: autoría propia.

Más concretamente, el método pedoantracológico cuantifica e identifica taxonómicamente los restos procedentes de la vegetación leñosa incendiada (Thinon, 1992; Talon, 1997). Este carbón se conserva prácticamente inalterado durante largos periodos de tiempo, lo que permite analizar, con un elevado nivel de detalle, la composición de comunidades de plantas leñosas del pasado, procedimiento que generalmente va acompañado de dataciones radiocarbónicas (Nelle et al., 2013).

Las primeras tentativas pedoantracológicas tuvieron lugar en Francia durante los años 70 del pasado siglo. En ese momento, Jacquot et al. (1973) aprovecharon el potencial de los carbones preservados en el suelo como recurso para estudiar la historia de la vegetación. Sin embargo, no fue hasta 1978, de la mano de Michel Thinon, cuando la pedoantracología se constituyó metodológicamente como disciplina paleoecológica (Cunill, 2010).

Desde su origen, Francia se ha erigido como el principal referente en pedoantracología. El país galo posee a los mayores expertos en la materia, como el anteriormente señalado Michel Thinon, así como a los también especialistas Jean-Louis Vernet, Marie-Claude Bal, Brigitte Talon o Christopher Carcaillet (Cunill, 2010; Nelle et al., 2013). Especialmente intensa fue la labor desarrollada por los dos últimos en los Prealpes y Alpes franceses durante los años 90, con varios ensayos pedoantracológicos aplicados al estudio de las dinámicas del límite superior del bosque, entre los que destacan los realizados por Carcaillet & Talon (1996, 2001), Talon (1997, 2010), Carcaillet (1998, 2001) y Talon et al. (1998). Otras regiones del país galo, como el valle del Ródano, también han sido ampliamente estudiadas por Bertran et al. (1998), Berger & Thiébault (2002) y Delhon et al. (2009).

En otros países europeos esta disciplina también ha sido desarrollada durante los últimos años, destacando diferentes investigaciones realizadas en Italia, entre las que se incluyen las

llevadas a cabo por Favili et al. (2010) y Moser et al. (2017); en Suiza, como la labor realizada por Carnelli et al. (2004); en Alemania, donde sobresalen los trabajos desarrollados por Nelle & Schmidgall (2003), Baumann & Poschlod (2008), Poschlod & Baumann (2010), Robin et al. (2011) y Quednau & Ludemann (2017); o en República Checa, con diferentes investigaciones pedoantracológicas desarrolladas por Novák et al. (2010, 2012).

Fuera del continente europeo esta metodología también ha sido empleada recientemente como disciplina paleoecológica, especialmente en América. Aquí se incluyen trabajos como los llevados a cabo por Di Pascuale et al. (2008, 2010) en Ecuador y Lindsoug & Villafanez (2020) en Argentina; Ybert et al. (2003) en Brasil y Talon et al. (2005) en Canadá.

En España, la tradición científica de este método es igualmente reciente. El primer ensayo pedoantracológico tendría lugar en 2008 (ver Cunill et al., 2008). Este estudio analizaría las consecuencias que los diferentes usos del suelo supusieron en la dinámica del límite superior del bosque en la vertiente sur del Pirineo, materializándose dos años después en la tesis doctoral defendida por Raquel Cunill Artigas, titulada “Estudi interdisciplinari de l’evolució del límit superior del bosc durant el període holocènic a la zona de Plaús de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català. Pedoantracologia, palinologia, carbons sedimentaris i fonts documentals” (ver Cunill, 2010). La autora, miembro del Grupo de Recerca de Àrees de Muntanya i Paisatge (GRAMP), junto al resto de integrantes de este grupo de investigación de la Universitat Autònoma de Barcelona, sentaría las bases para el posterior desarrollo de esta disciplina a nivel nacional. La intensa labor pedoantracológica desarrollada en el Pirineo quedaría plasmada en diferentes publicaciones (ver Cunill et al., 2012, 2013; Soriano et al., 2016; Pèlach et al., 2017). Desde hace varios años también se emplea en otros sistemas montañosos peninsulares, como la Cordillera Bética, donde destacan las investigaciones desarrolladas por Gómez-Zotano et al. (2015, 2017, 2018) y Olmedo-Cobo et al. (2016, 2017, 2018, 2019ab), así como el Sistema Central (ver García-Álvarez et al., 2017), Cordillera Prelitoral catalana (ver Cunill et al., 2018) y Cordillera Cantábrica (ver Beato-Bergua, 2018; Beato-Bergua et al., 2019).

Se trata, por tanto, de una metodología que ha experimentado un interés creciente como fuente de conocimiento paleoecológico durante los últimos años. Ello se debe, en buena medida, al elevado nivel de detalle que alcanza (Nelle et al., 2013). Esta circunstancia posibilita que el análisis pedoantracológico pueda ser aplicado para diferentes fines paleoecológicos, como, por ejemplo: (1) Contribuir al conocimiento de las oscilaciones altitudinales experimentadas por el límite superior del bosque; (2) Ayudar a determinar las causas (naturales y/o antrópicas) que han favorecido cambios en los paisajes vegetales de montaña; (3) Analizar la significación espaciotemporal de los incendios forestales; (4) Mejorar el conocimiento biogeográfico y paleobiogeográfico de una especie o comunidad concreta (Cunill, 2010; Nelle et al., 2013).

Respecto a los taxones que más interés han suscitado hasta el momento en España destacan los pertenecientes a coníferas de montaña, como *Abies alba* o *Pinus sylvestris/uncinata* en el Pirineo Catalán, *Taxus baccata* en la Cordillera Cantábrica y *Pinus pinaster* y *Abies pinsapo* en

la Cordillera Bética. Por su parte, los géneros de planifolias más ampliamente estudiados han sido *Betula*, *Corylus*, *Fagus*, *Populus* y *Quercus*.

El interés paleobiogeográfico suscitado por el grupo de las coníferas de montaña ha motivado que desde 2014 se vayan desarrollando diferentes ensayos pedoantracológicos liderados por investigadores del Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física de la Universidad de Granada. Dentro de este apartado se incluyen los proyectos de investigación financiados por el Ministerio de Economía y Competitividad denominados “Reconstrucción geohistórica de la vegetación arbórea sobre sustratos ultramáficos mediterráneos” (ULTRAFORRESTS) y “Reconstrucción paleobiogeográfica de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. a partir del análisis pedoantracológico: nuevos datos para la gestión de la especie y su hábitat” (PALEOPINSAPO), cuyos ámbitos de aplicación fueron Sierra Bermeja y el conjunto de la Serranía de Ronda, respectivamente. Ambos han posibilitado que por primera vez se desarrolle la pedoantracología en la Cordillera Bética, metodología que, en concreto, ha permitido obtener información inédita acerca del pasado de *A. pinsapo* en la Serranía de Ronda, amén de otras coníferas de montaña como *Pinus* tipo *nigra/sylvestris*.

1.2. Conocimiento paleobiogeográfico de *Abies pinsapo*

A. pinsapo es una singular conífera de carácter relicto. Se trata de una especie endémica del sur de la península ibérica que tiene su área de distribución actual en tres núcleos muy reducidos y fragmentados, como son la Sierra de las Nieves, la Sierra de Grazalema y Sierra Bermeja (Valladares, 2009).

Esta especie se encuentra catalogada como en peligro de extinción (EN), estando incluida en el Libro Rojo de la flora silvestre amenazada de Andalucía (Blanca-López et al., 1999) y en la Lista Roja de la Flora Vasculare de Andalucía (Cabezudo et al., 2005). Ello ha provocado que el conocimiento existente sobre la realidad actual de la especie, desarrollado en las últimas décadas, sea notable y cubra eficientemente aquellos campos científicos que tienen por objeto su conservación. Destacan diversos trabajos realizados por las administraciones públicas, entre los que se incluyen aquellos desarrollados por la Junta de Andalucía (1996-1999, 2003, 2008, 2011), así como otras publicaciones científicas recientes llevadas a cabo por Gómez-Zotano (2003), Navarro-Cerrillo et al. (2006), Soto (2006), Linares et al. (2009, 2010, 2011, 2013), De Vita et al. (2010), Sánchez-Robles et al. (2012), Blanes et al. (2013), López-Tirado & Hidalgo (2014), García-Esteban et al. (2015). La mayoría de estas investigaciones van encaminadas al estudio de la especie en la actualidad o en el pasado reciente (desde el siglo XVIII), siendo la conservación, restauración y regeneración de sus bosques, la protección de sus hábitats y la lucha contra las amenazas reales que afectan a los abetales los principales objetivos desarrollados.

En relación con el apartado de amenazas, los principales factores de riesgo que actualmente amenazan a *A. pinsapo* son los incendios forestales, el aislamiento de las poblaciones y sus características monoestructurales, la modificación de sus hábitats, las enfermedades asociadas

a hongos e insectos y, en menor medida, la hibridación y la contaminación atmosférica (López-Quintanilla, 2013). Estas circunstancias han frenado, en parte, la recuperación que ha experimentado la especie desde mediados del siglo XX una vez disminuyó la presión antrópica en sus nichos ecológicos (talas, carboneo y sobrepastoreo) (Junta de Andalucía, 2010). Incluso se pueden identificar localidades donde *A. pinsapo* ha desaparecido a partir de catástrofes naturales inducidas (incendios forestales provocados) o por deforestación directa asociada a la tala del arbolado; Gómez-Zotano (2006), Soto (2006) y Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo (2021) han identificado estos enclaves en las sierras de Alcaparaín, Palmitera, Real, de las Apretaderas (Málaga) y Sierra de los Pinos (Cádiz), a los que hay que añadir otras masas de pinsapar perdidas por los mismos motivos y nunca recuperadas en las sierras donde hoy se conserva *A. pinsapo*.

Desde el punto de vista de la paleobiogeografía de la especie, buena parte de la información generada hasta el momento procede fundamentalmente de dos fuentes principales: los modelos de distribución de especies (MDE) y los análisis polínicos. Referente a los primeros, sobresale el trabajo realizado por Alba-Sánchez & López-Sáez (2013), quienes elaboran un modelo de idoneidad de *A. pinsapo* para el conjunto de las Béticas. La cartografía asociada muestra cómo los mayores niveles de idoneidad se restringen al sector rondeño de la provincia Bética, enclave donde actualmente se localizan las poblaciones de pinsapo. El modelo amplía el área de habitabilidad de este abeto a otros sistemas montañosos del sur peninsular en los que actualmente no pervive la especie. Así, otros enclaves de la orla bética como Sierra Gorda, Sierra Tejada y el macizo de Sierra Nevada parece que pudieron reunir las condiciones ecológicas para haber albergado antiguas poblaciones de pinsapo. El área de distribución mostrada por el modelo se extiende hacia zonas externas de la Cordillera Bética, como la Sierra de Cazorla y la Sierra de Alcaraz, territorios montañosos de litología calizo-dolomítica en cuyas zonas más elevadas actualmente se desarrollan comunidades de sabina rastrea y pino salgareño (Gómez-Mercado, 2011). En este caso, el porcentaje de idoneidad se reduce significativamente con respecto al de los enclaves anteriores, quedándose en un máximo del 50 %. Según estas modelizaciones, las áreas que potencialmente pudieron albergar *A. pinsapo* en el pasado se restringen al sector suroccidental de la unidad Cazorla-Segura-Alcaraz, coincidiendo con las cotas más altas de este conjunto fisiográfico. Finalmente, la potencialidad de esta conífera mostrada por el modelo se extiende hacia zonas del Levante peninsular, perfilando diferentes áreas de idoneidad –con un porcentaje inferior al 50 %– en torno a la comarca de La Safor (Valencia) y de las alicantinas sierras de Aitana y Alfaro.

Por su parte, dentro de los estudios polínicos se incluyen las investigaciones realizadas por Florschütz et al. (1971), Valle et al. (2003), Carrión et al. (2008), Alba-Sánchez et al. (2010, 2018) y Alba-Sánchez & López-Sáez (2013). En ellas se constata la presencia de polen de *Abies* en diferentes puntos (charcas, turberas o cuevas) del sur y este peninsular. Entre estos registros se incluye, por ejemplo, el correspondiente al de la Cueva de Gorham (Gibraltar), cuya cronología se sitúa entre 19 000-16 000 años cal BP, mostrando porcentajes que en determinados niveles estratigráficos superan el 5 %. Este valor, detectado en secuencias

paleopalinológicas, teóricamente asegura tanto la presencia local de *Abies* como la posible expansión de sus poblaciones (Van de Knapp et al., 2005; Alba-Sánchez et al., 2009).

Hacia el este, y siguiendo la línea costera mediterránea, la Cueva de Bajondillo, en Torremolinos (Málaga), atestigua la presencia de polen de pinsapo durante varios momentos del Pleistoceno Superior y Holoceno, concretamente en tres intervalos temporales del Pleniglacial comprendidos entre 50 000-42 000 años cal BP, 40 000-38 000 años cal BP y 35 000-20 000 años cal BP y un intervalo del Interestadío Bölling/Allerod (13 000-11 000 años cal BP), para reaparecer finalmente, aunque ya de forma anecdótica, hace 7400-7200 años cal BP. También resulta interesante el registro polínico de la Cueva del Boquete de Zafarraya, localizada en un sector montañoso a poco más de 1000 m s. n. m. En este punto, el polen de pinsapo aparece durante el Pleistoceno Superior (hace unos 46 000 años cal BP), si bien su presencia es meramente testimonial.

En la provincia granadina, la turbera de El Padul, situada en la base del sector occidental de Sierra Nevada, se erige como uno de los referentes de la paleovegetación de la península ibérica y del suroeste europeo (Camuera et al., 2017). Menéndez-Amor & Florschütz (1962), pioneros en estudiar desde una perspectiva palinológica esta turbera, atestiguaron la presencia de polen de *Abies* (< 1 %) durante el Pleistoceno Medio, hace unos 400 000-200 000 años cal BP, momento en el cual los pinsapares y otros abetales circunmediterráneos pudieron haber estado presentes en el macizo nevadense (Linares & Carreira, 2006). Este registro, por tanto, constituye el de mayor antigüedad en la península ibérica conocido hasta el momento. Investigaciones posteriores, como la emprendida por Florschütz et al. (1971), documentan nuevamente la presencia de pinsapo en algún momento del Pleistoceno Medio, periodo en el cual los abetales formarían densos bosques junto a acebos, robles, hayas, tsugas y fresnos, entre otros taxones arbóreos. Posteriormente, el polen de *Abies* vuelve a manifestarse en la secuencia polínica de El Padul a finales del Interglaciario Eemiense (120 000-110 000 años cal BP), correspondiendo con un periodo relativamente templado y húmedo. Ya en 1988, el estudio llevado a cabo por Pons y Reille cuestiona algunas conclusiones derivadas de publicaciones precedentes, especialmente aquellas referentes a la cronología de los cambios en la vegetación. En este sentido, si bien el pinsapo sigue apareciendo durante el Pleistoceno Superior, su presencia se remonta a alguno de los periodos interestadiales posteriores al Interglaciario Eemiense, concretamente hace 110 000-74 000 años cal BP, situando sus primeros registros en la cuenca granadina más próximos en el tiempo. Por último, y con un peso relativo menor, el polen de pinsapo sigue apareciendo en diferentes interestadios würmienses entre 60 000 y 30 000 años cal BP. El trabajo realizado por Valle et al. (2003) nuevamente pone de manifiesto la presencia puntual de pinsapo en tres periodos concretos del final del Pleistoceno: inicios del Tardiglaciario (17 000 años cal BP), una etapa dominada por la vegetación esteparia en un paisaje de pinar; durante el Allerod (11 800-11 000 años cal BP), momento de expansión de las quercíneas; y durante el Dryas reciente (11 000-10 000 años cal BP), instante en el cual su población aumenta hasta llegar al 5 %.

Más al norte, Carrión et al. (2001) llevaron a cabo un análisis polínico en la Cueva de Las Ventanas (Piñar), concluyendo que el pinsapo estuvo presente hace 10 700 años cal BP. De igual interés resulta el registro de polen de pinsapo del Circo de Rio Seco, enclave glaciar situado a 3120 m s.n.m. en Sierra Nevada. Su cronología, 1500 años cal BP, así como su ubicación en la cuenca del río Poqueira (ladera sur de Sierra Nevada), podría informar de la presencia de pequeñas poblaciones de pinsapo en torno a los diferentes barrancos que discurren por la vertiente sur del macizo, zonas potencialmente habitables para este abeto, tal y como muestra el modelo de idoneidad desarrollado por Alba-Sánchez & López-Sáez (2013).

Las evidencias polínicas también se extienden a otras zonas de Andalucía, como la Cueva del Cucú, enclave localizado a 1610 m s.n.m en la Sierra de María (Almería), donde el pinsapo pudo estar presente al final del Interglaciar Eemiense, hace unos 110 000 años cal BP). Igualmente se ha detectado la presencia de polen de *Abies* en determinados humedales de Roquetas de Mar y Antas, también en la provincia de Almería, con varias cronologías incluidas dentro del Holoceno (5900 y 8800-6000 años cal BP, respectivamente). De la misma manera, en el Levante peninsular aparecen numerosas evidencias polínicas que informan de la presencia potencial de *Abies* durante el Último Máximo Glacial y el Holoceno. Destacan los registros de la Laguna de Villena (6300-6200 años cal BP), Cueva de Tossal de la Rosa (16 000-13 000 y 12 000-11 800 años cal BP), Cueva de En Pardo (14 600-13 000 años cal BP), Laguna de San Benito (5000-4000 y 1500-1400 años cal BP), Cueva de Les Malledetes (15 000-13 000 años cal BP) y Turbera de Torreblanca (6000 años cal BP). Asimismo, sobresalen los restos de polen de *Abies* hallados en diferentes enclaves insulares de las Islas Baleares, entre los cuales se incluyen los registros polínicos detectados en determinados humedales localizados en la Albufera de Alcudia (6900-6500 y 300 años cal BP), Cala Caldana (7600-6400 años cal BP) y Cala'n Porter (7800-4800 años cal BP).

1.3. Conocimiento histórico de *Abies pinsapo*

Las fuentes históricas con alguna referencia explícita al pinsapo comprenden desde el siglo XVI hasta la actualidad. En general, son escasas las referencias documentales sobre esta especie o su presencia en el paisaje (Guzmán et al., 2013). Destaca la información recopilada por Gil (2002), Gómez-Zotano (2003, 2006) y Becerra (2006) a partir de la revisión de los siguientes documentos: Ordenanzas Municipales de la ciudad de Ronda y su jurisdicción en 1508; Ordenanzas Municipales de la villa de Zahara de la Sierra en 1575; Inventarios de maderas para abastecer a la Marina o para la construcción de viviendas en Villaluenga en 1754 y 1766; Noticias sobre el "Pino del Oso" utilizado como mojón en el deslinde entre Ronda y Tolox en 1635, 1809 y 1870; Preguntas Generales y Particulares del Catastro del Marqués de la Ensenada para los distintos pueblos de la comarca a mediados del siglo XVIII; Cartas Geográficas o Mapas Generales de los Pueblos y sus Principales Arboledas de las provincias de la Marina de mediados del siglo XVIII, considerándose como la primera aproximación cuantitativa a la extensión del pinsapo; Diccionario de Andalucía de Tomás López de 1780; Diccionario Enciclopédico de Pascual Madoz de 1845-1850; y, finalmente, los testimonios

escritos de viajeros, cazadores, ingenieros y naturalistas como Guillermo Bowles en 1752 o el valenciano Simón de Rojas Clemente, quien en 1818 realizó la primera descripción científica del pinsapo, especie arbórea que el citado naturalista había conocido por primera vez en 1809 durante su viaje a Sierra Bermeja; sin embargo, no sería hasta 1837, de la mano de Edmond Boissier, cuando el pinsapo alcanzase el estatus de nueva especie para la ciencia, dándole relevancia internacional a este singular abeto. Asimismo, también destacan las contribuciones aportadas por Samuel Edward Cook Widdrington en 1829 y 1839, Moritz Willkomm en 1844, Antonio Laínez en 1858, Mariano Laguna en 1868, Abel Chapman y Walter J. Buck en 1907, Luís Ceballos y Manuel Martín Bolaños en 1928 y 1930, A. Barbey en 1930, y Luís Ceballos y Carlos Vicioso en 1933 (Guzmán et al., 2013). Las referencias generales o particulares se incrementan sobremanera desde finales del siglo XIX y durante la primera mitad del siglo XX.

2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN, HIPÓTESIS DE PARTIDA Y OBJETIVOS GENERAL Y ESPECÍFICOS

2.1. Justificación y pertinencia de la investigación

La caracterización paleobiogeográfica de la vegetación actual constituye una tarea fundamental para comprender los principios explicativos que ayudan a interpretar las relaciones entre especies y ambientes (Miller, 2010). Esta perspectiva retrospectiva convierte a la información derivada de las fuentes paleoecológicas en un recurso de gran utilidad para la gestión de la conservación tanto presente como futura (Willis et al., 2007).

Este hecho adquiere mayor importancia cuando este análisis incluye a especies muy singulares desde el punto de vista ecológico y especialmente sensibles a cualquier alteración y/o perturbación ambiental, como sucede con aquellos taxones arbóreos que conforman el límite superior del bosque (Kimball & Weihrauch, 2000; Batllori et al., 2009). Estos bosques altimontanos son ecosistemas muy frágiles, una situación de vulnerabilidad que provoca que sean los primeros en manifestar los efectos derivados del Cambio Global (Smith et al., 2009). Esta particularidad convierte a las zonas de montaña en magníficos laboratorios para monitorear las diferentes respuestas ofrecidas por los bosques altimontanos en el citado escenario de cambio (Chen et al., 2022). Predecir los cambios de la floresta altimontana constituye, de esta manera, una tarea prioritaria para su conservación. Ello supone conocer de qué manera se adaptan los ecosistemas vegetales a los cambios ambientales, lo cual ha generado un importante volumen de bibliografía al respecto durante los últimos años (ver Herrero & Zavala, 2015).

Sin embargo, este incremento en el número de ensayos paleoecológicos apenas ha tenido a *A. pinsapo* como objeto de estudio. El primer estudio que planteó la mayor extensión de los abetales en el Mediterráneo occidental en el pasado fue acometido por Linares (2011), quien confirmó su hipótesis a partir de una extensa revisión bibliográfica del género *Abies* en la cuenca mediterránea. Posteriormente, las contadas reconstrucciones paleobiogeográficas de esta especie procedían fundamentalmente de análisis polínicos (ver Carrión, 2012, 2022) y modelizaciones de especies (ver Francisca-Alba & López-Sáez, 2013). Respecto a los primeros, además, hay que añadir que gran parte de las señales polínicas muestran porcentajes muy reducidos ($\leq 3\%$) para el género *Abies* tras el Último Máximo Glacial, circunstancia que no permite asegurar la presencia local del pinsapo en aquellos enclaves en los que fue identificado. Los segundos, por su parte, se apoyan en regresiones multivariadas para definir diferentes niveles de habitabilidad para este abeto en la Cordillera Bética. Ello implica una simplificación estadística del proceso espaciotemporal que subyace a la distribución de dicha especie, lo cual lleva asociado un elevado nivel de incertidumbre (Pearson et al., 2006; Zurell et al., 2009). En consecuencia, las representaciones cartográficas propias de estas modelizaciones no reflejan con exactitud la compleja red de mecanismos, funciones e

interrelaciones propias de cada ecosistema, resultando en construcciones biogeográficas y paleobiogeográficas parciales (Varela et al., 2011).

Asimismo, hasta el momento las exiguas aproximaciones paleobiogeográficas de *A. pinsapo* cubrían aquellos territorios montañosos de los sectores central y nororiental de la Cordillera Bética, mientras que el flanco suroccidental de esta extensa cadena montañosa, donde pervive esta singular conífera en la actualidad, sigue acusando un marcado déficit en este sentido. Es el caso de la Serranía de Ronda, un vasto conjunto fisiográfico de gran relevancia histórica, ecológica y paisajística (Castillo, 2002; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021). Su estratégica situación, a caballo entre dos masas de agua de distinta naturaleza, como son el Mar Mediterráneo y Océano Atlántico, así como entre dos continentes muy contrastados a diferentes niveles –Europa y África–, le ha conferido, desde tiempos históricos, un carácter muy particular que ha condicionado la evolución de un amplio catálogo de taxones arbóreos (Pérez-Latorre et al., 2021). En consecuencia, dada la originalidad del marco geográfico-histórico de la Serranía de Ronda, este territorio representa un interesante campo experimental de reconocimiento de dinámicas espaciotemporales de los bosques, así como de las necesidades derivadas de sus políticas de conservación y gestión frente al Cambio Global.

El escaso conocimiento paleobiogeográfico de *A. pinsapo* se debe, en parte, a que los sondeos paleopalinológicos necesitan contextos muy concretos para su realización, como turberas, lagos o lagunas, medios generalmente poco abundantes en el sur peninsular (López-García & López-Sáez, 1994). No obstante, también existe la posibilidad de analizar los sedimentos procedentes de yacimientos arqueológicos, si bien este tipo de ambientes antrópicos plantea importantes limitaciones, como son la propia destrucción de los granos de polen, la contaminación inter-nivel o la existencia de importantes hiatos sedimentarios (Dupre, 1979), circunstancias que limitan notablemente la reconstrucción del paisaje vegetal pretérito. Estos condicionantes podrían explicar que, a día de hoy, tan solo se haya emprendido un estudio polínico en la Serranía de Ronda, cuyas conclusiones fueron publicadas por Alba-Sánchez et al. (2019, 2021).

Como se ha señalado con anterioridad, también escasas son aquellas fuentes históricas que aportan información sobre la distribución y extensión pretérita de los bosques de *A. pinsapo*, destacando las referencias históricas recogidas por Gil (2002), Gómez-Zotano (2003, 2006) y Becerra (2006). Si bien este tipo de datos sí que aporta gran precisión espacial (al contrario que el registro paleopolínico), la escala temporal de estos testimonios es muy limitada. A este respecto, las primeras referencias a esta especie datan del siglo XVI.

En última instancia, estas limitaciones se traducen en un conocimiento paleobiogeográfico de *A. pinsapo* impreciso y limitado. Son circunstancias que recomiendan emplear otras metodologías paleoecológicas, las cuales permitan obtener respuestas certeras acerca del pasado de la especie. Por ello, desde hace algunos años se han venido desarrollando diferentes análisis pedoantracológicos emprendidos por investigadores del Laboratorio TerraLab de la Universidad de Granada. Por primera vez, estos ensayos han permitido obtener

información paleoecológica contrastada sobre *A. pinsapo* en la Serranía de Ronda, un territorio prácticamente inexplorado en este ámbito de conocimiento. No obstante, si bien las citadas investigaciones han supuesto la consecución de información clave acerca del pasado del pinsapo, la pedoantracología es aún una disciplina de escasa tradición científica en el conjunto de la Serranía de Ronda. Por tanto, los datos colectados hasta el momento constituyen una primera aproximación acerca de la hipotética área de distribución que este abeto relicto pudo haber ocupado en el pasado, y sugieren ampliar la red de muestreos pedoantracológicos con el fin de poder seguir descifrando la paleobiogeografía de la especie.

El presente proyecto de tesis plantea aplicar el método pedoantracológico a otras localizaciones de la Serranía de Ronda, dando continuidad a aquellos estudios pioneros. La elección de este método garantiza que pueda ser aplicado sobre topografías muy heterogéneas, cubriendo una de las limitaciones de la palinología. Al mismo tiempo, y como consecuencia de su elevada precisión espacial, permite obtener información paleoecológica fidedigna de los diferentes taxones identificados, posibilitando que se pueda contrastar la veracidad de la información paleoecológica procedente de otras fuentes, como los estudios polínicos o los MDE. Asimismo, los datos pedoantracológicos permiten cubrir una amplia escala temporal, como es la del Holoceno, solventando una de las limitaciones propias de los testimonios históricos. Finalmente, su aplicación garantiza la consecución de un conocimiento paleoecológico inédito en un ámbito geográfico tan singular como es la Serranía de Ronda, uno de los territorios montañosos del sur peninsular que más déficit acusa al respecto.

2.2. Hipótesis de partida y objetivos general y específicos

En este contexto, la **hipótesis principal** de la investigación parte del hecho de que, durante la transición Pleistoceno-Holoceno, las poblaciones de *A. pinsapo* –así como de otras coníferas orófilas mediterráneas– habrían formado una masa forestal más o menos continua en montañas de media y baja altitud, con un área de distribución más amplia que la actual en la Serranía de Ronda. Con la constatada mejora climática del Holoceno, estas poblaciones experimentarían una migración altitudinal desde las zonas más bajas, pudiendo haber colonizado enclaves más elevados, los cuales, gracias a condiciones climáticas más favorables para su hábitat, pudieron haber actuado como refugios postglaciales del pinsapo. Las migraciones en altitud de este abeto conducirían probablemente a la fragmentación de su hábitat y al aislamiento de sus poblaciones, lo que podría haber aumentado la probabilidad de extinciones locales en un contexto de progresivo incremento de los procesos de antropización del medio.

Considerando la hipótesis de partida anteriormente señalada, la presente investigación plantea dar respuesta a los siguientes interrogantes:

- ¿Era mayor el área de distribución de *A. pinsapo* en el pasado?

- ¿Qué localizaciones montañosas pudieron actuar de refugio para la especie durante los últimos milenios?
- ¿Qué factores pudieron motivar la hipotética extinción local del pinsapo?

Todo ello bajo el **objetivo general** de favorecer la conservación futura de *A. pinsapo* y su hábitat mediante la reconstrucción paleobiogeográfica.

De una forma más pormenorizada, la finalidad de esta investigación queda fundamentada de acuerdo con los siguientes **objetivos específicos**:

- Conocer la distribución y extensión actual y potencial de *A. pinsapo* mediante el estudio, comparación y contextualización de las diferentes fuentes de información disponibles.
- Caracterizar desde una perspectiva geográfica, biogeográfica y fitogeográfica el ámbito de estudio.
- Obtener una visión lo más detallada posible de la evolución de los bosques de *A. pinsapo*, especialmente a partir de los vaivenes climáticos acontecidos desde el Último Máximo Glacial, analizando la naturaleza de las diferentes perturbaciones que han llevado a reducir su extensión hasta su distribución actual.
- Comparar, a partir del análisis e identificación de los carbones encontrados, los diferentes escenarios propuestos por las distintas fuentes de información (MDE, estudios palinológicos y fuentes históricas), validando la fidelidad de éstas.
- Elaborar una cartografía detallada de la distribución paleobiogeográfica y actual de *A. pinsapo* en el sur peninsular.

3. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Financiación general

La presente tesis doctoral ha sido desarrollada en el marco de apoyo institucional y financiero de las ayudas de Formación de Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España (Ref. 18/03023). De forma complementaria, el trabajo desarrollado ha recibido el apoyo financiero del grupo de investigación HUM-771: Paisaje, Medio ambiente y Ordenación Territorial.

3.2. Vinculación del proyecto de tesis con proyectos de investigación subvencionados

La reconstrucción paleobiogeográfica de *A. pinsapo* objeto de estudio de este proyecto de tesis doctoral ha sido posible gracias a la plena vinculación de esta con varios proyectos de investigación de carácter paleoecológico. Desde el primer momento este trabajo se desarrolló de forma síncrona al proyecto de investigación denominado “Reconstrucción paleobiogeográfica de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. a partir del análisis pedoantracológico: nuevos datos para la gestión de la especie y su hábitat” (PALEOPINSAPO), financiado Ministerio de Economía y Competitividad Gobierno de España, con el código de referencia CSO2017-83576-P. La relación entre ambos proyectos ha sido completa, lo que ha permitido aunar esfuerzos en aras de cumplir con los objetivos planteados.

Posteriormente, y fruto de la colaboración con otros investigadores de la Universidad de Granada, el proyecto de tesis se enmarcó en diferentes proyectos de investigación afines, todos ellos de carácter paleoecológico y con *A. pinsapo*, así como otras coníferas relictas, como objeto de estudio. Dentro de estos proyectos se incluyen los siguientes:

- “Long-term drivers of adaptive capacity in Mediterranean conifers under global change: interglacial mountain refugia matter (OroMed-Refugia)”, financiado por la Junta de Andalucía, con el código P18-RT-4963.
- “Interglacial refugia in Western Mediterranean Mountains. Implications for montane conifers conservation (Med-Refugia)”, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, con el código RTI2018-101714-B-I00.
- Estimación de múltiples escenarios climáticos para la conservación de la diversidad genética en ecosistemas forestales del Mediterráneo (FORESTMED), financiado por el Programa Operativo FEDER Andalucía 2014-2020, con el código A-RNM-688-UGR20.
- *Abies pinsapo*: ¿Refugio más allá de la Cordillera Bética occidental? Comprender el pasado para asegurar el futuro de los bosques de pinsapo (PALEOPINSAPO II), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, con el código PID2022-141592NB-100.

3.3. Trabajo de campo

El elevado volumen de trabajo de campo realizado a lo largo de los últimos años ha demandado un importante operativo logístico. Gran parte de las catas pedológicas han sido realizadas en lugares montañosos de difícil acceso para cualquier tipo de vehículo a motor, lo que ha requerido de largas caminatas por topografías agrestes para alcanzar los enclaves a mostrar. Como consecuencia de ello, el porteo de material ha necesitado de la participación de numerosas personas, “dificultad” que ha sido solventada con relativa facilidad gracias al nexo permanente de este trabajo con los proyectos de investigación anteriormente citados, cuyos miembros han colaborado activamente en las diferentes salidas de campo realizadas.

Asimismo, una parte importante de los muestreos se han localizado en espacios naturales protegidos, como el Parque Nacional de la Sierra de las Nieves, el Parque Natural de la Sierra de Grazalema y el Paraje Natural de los Reales de Sierra Bermeja. Esta circunstancia ha obligado a coordinarse de forma permanente con la Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul de la Junta de Andalucía, así como con las distintas delegaciones territoriales homónimas de las provincias de Cádiz, Málaga y Sevilla. De esta forma, todo el trabajo de campo desarrollado se ha realizado dentro de los límites legales establecidos en materia medioambiental. En ningún caso, las diferentes actividades de investigación realizadas, como las tareas de excavación, han conllevado impactos ambientales.

3.3. Recursos económicos

Tanto el trabajo de campo como el trabajo de laboratorio han precisado de recursos materiales y económicos. Respecto al trabajo de campo, los gastos derivados de los desplazamientos y dietas han sido cubiertos por los diferentes proyectos de investigación señalados con anterioridad. Por su parte, para el trabajo de laboratorio ha sido indispensable acceder a las instalaciones del Laboratorio de Geografía Física de la Universidad de Granada. Ello ha sido posible gracias al contrato predoctoral de Formación de Profesorado Universitario (Ref. 18/03023).

Especial mención –por su elevado coste– merecen las dataciones radiocarbónicas realizadas. Nuevamente, y gracias a la vinculación del proyecto de tesis con los proyectos de investigación PALEOPINSAPO, OroMed-Refugia, Med-Refugia y FORESTMED, se han podido cubrir los gastos derivados de esta prueba. La información derivada de la misma, en forma de cronologías para diferentes taxones arbóreos, ha sido un requisito fundamental a la hora de cumplir satisfactoriamente con los objetivos de la investigación.

4. PUBLICACIONES Y ACTIVIDADES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Publicaciones indexadas en bases de datos con un índice de calidad relativo:

1. **PARDO-MARTÍNEZ, R.** (2020). La pedoantracología en España: una revisión bibliográfica. *Pirineos*, 175, e059. DOI: 10.3989/pirineos.2020.175009

La primera tarea de envergadura del proyecto de tesis ha sido la de abordar el estado de la cuestión de la pedoantracología en España. La consecución de este cometido ha servido no solo para comprobar la situación de tal disciplina paleoecológica en nuestro país, sino que también ha ayudado a reforzar la necesidad de llevar a cabo este estudio, estableciendo el que ha sido el punto de partida a partir del cual se ha desarrollado el mismo. Asimismo, el contacto telemático con todos aquellos investigadores que, de una forma u otra, han tenido alguna relación –bien fuese directa o indirecta– con la pedoantracología, ha favorecido el establecimiento de importantes lazos profesionales, muchos de los cuales se han consolidado desde entonces.

Este artículo ha sido publicado en “Pirineos. Revista de Ecología de Montaña”. La revista está editada por el Instituto Pirenaico de Ecología. Incluye trabajos relacionados con la dinámica de los ecosistemas de montaña, contribuyendo a comprender el funcionamiento integral de estas frágiles y singulares regiones.

En 2019, el índice del SCImago Journal Rank (SJR) de esta revista era de 0.269, situada en el cuartil 3 (Q3) en el área de revistas de *Ecology*.

2. **OLMEDO-COBO, J.A., PARDO-MARTÍNEZ, R. & GÓMEZ-ZOTANO, J.** (2021). Primeros datos sobre la composición holocena de los bosques de montaña en el Parque Natural Sierra de las Nieves (Serranía de Ronda) a partir del análisis pedoantracológico. *Boletín de la Asociación Española de Geografía*, 89. DOI: 10.21138/bage.3099

Una vez acometido el estado del arte, la siguiente tarea ha sido la de determinar aquellas localizaciones que debían ser muestradas. La red de catas pedológicas, inicialmente planteada por Gómez-Zotano et al. (2015, 2017) y Olmedo-Cobo et al. (2016, 2017) en Sierra Bermeja, ha sido ampliada hacia otros sistemas montañosos de la Serranía de Ronda. Especialmente importante ha sido el trabajo desarrollado en la Sierra de las Nieves, cuya declaración como parque nacional ha tenido lugar durante el transcurso de la presente investigación, concretamente en julio de 2021. En este sentido, si bien el objeto de estudio de este trabajo es *A. pinsapo*, se ha considerado que era importante ofrecer toda aquella información paleoecológica acerca del pasado de la vegetación arbórea obtenida en el espacio natural más significativo del ámbito de estudio. Ello ha permitido no solo proporcionar datos paleohistóricos sobre el pinsapo, sino también de otros taxones arbóreos de gran interés ecológico y paisajístico, enriqueciendo cualitativamente la investigación.

Este manuscrito ha sido publicado en el “Boletín de la Asociación Española de Geografía (BAGE)”. Esta revista fue creada en 1984 y está editada por la Asociación Española de Geografía. En la misma se incluyen todas aquellas investigaciones realizadas por comunidad geográfica nacional e internacional, tanto académica como profesional. Abarca todas aquellas temáticas que tengan como objeto de estudio los diferentes procesos territoriales que tienen lugar a diversas escalas.

Respecto a los índices de calidad, la revista está incluida en JCR (Journal Citation Report) de Clarivate (Web of Science), en SCOPUS y tiene el sello de calidad de la FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología).

En 2020, el BAGE tenía un índice SJR de 0.37, clasificándose en el cuartil 2 (Q2) en el área de revistas de *Geography, Planning and Development*.

Ese mismo año, el factor de impacto JCR fue de 1.182, ocupando la posición 75 de 85 (Q4) de revistas incluidas en la categoría Geography.

3. PARDO-MARTÍNEZ, R., GÓMEZ-ZOTANO, J. & OLMEDO-COBO, J.A. (2022). The history of *Abies pinsapo* during the Holocene in southern Spain, based on pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 31, 307-321. DOI: 10.1007/s00334-021-00855-w

Tras cubrir la práctica totalidad de los relieves montañosos rondeños, el análisis taxonómico de los carbones hallados en diferentes localizaciones fisiográficas ha posibilitado la obtención de un importante volumen de información paleobiogeográfica. Estos datos han ofrecido testimonios reveladores sobre las dinámicas experimentadas por el pinsapo en los últimos milenios.

En consecuencia, esta publicación significa la consecución del principal objetivo de la investigación. Asimismo, permite cubrir una de las grandes lagunas de conocimiento que afectaban históricamente a la Serranía de Ronda.

El manuscrito ha sido publicado en “*Vegetation History and Archaeobotany*”. Esta revista forma parte del grupo editorial Springer e incluye aquellas investigaciones que tengan como campo de análisis fundamental la historia de la vegetación, especialmente durante el Holoceno.

En cuanto al índice de impacto, este era de 2.552 en JCR para el año 2021, clasificándose en el cuartil 1 (Q1) dentro de la categoría *Paleontology*.

En SJR, el índice de impacto en 2021 fue 1.02, situándose en el cuartil 1 (Q1) en la categoría de Plant Science.

4. GÓMEZ-ZOTANO, J., PARDO-MARTÍNEZ, R. & OLMEDO-COBO, J.A. (2023). Paleopopulations and ecological connectivity in the Natura 2000 Network: proposal for the serpentine-soil Spanish firs of Sierra Bermeja (Serranía de Ronda). *Environmental Earth Sciences*, 82, 220. DOI: 10.1007/s12665-023-10912-4

La generación de conocimiento paleobiogeográfico inédito sobre *A. pinsapo* ha ofrecido respuestas muy valiosas acerca del pasado y evolución de la especie durante los últimos milenios. De forma complementaria al interés científico suscitado por los resultados alcanzados, la información obtenida –una vez contextualizada con aquella derivada del resto de fuentes disponibles– ha servido de base para el desarrollo de diferentes acciones encaminadas a la conservación y gestión sostenible del pinsapo. Destacan distintas actuaciones de repoblación realizadas en determinadas localizaciones de la Serranía de Ronda, algunas de ellas llevadas a cabo en aquellos enclaves en lo que la pedoantracología ha demostrado que el abeto andaluz estuvo presente. Asimismo, a raíz de las conclusiones paleobiogeográficas obtenidas, y considerando que la fragmentación y aislamiento de sus poblaciones es una de las principales amenazas que afectan a esta singular conífera, se propone la conectividad de los pinsapares serpentinícolas de Sierra Bermeja.

Los resultados de esta propuesta han sido publicados en la revista internacional “*Environmental Earth Sciences*”, de la editorial Springer. En la misma se publican, entre otras muchas temáticas, trabajos multidisciplinares que aporten enfoques novedosos para mejorar el medio ambiente.

El factor de impacto JCR en 2021 era de 3.119, quedando incluida dentro del cuartil 2 (Q2) en la categoría Geosciences, Multidisciplinary.

En SJR, el factor de impacto en 2021 era 0.623, situándose en el cuartil 2 (Q2) en categorías como Earth-Surface Processes, Geology o Soil Science.

5. GÓMEZ-ZOTANO, J., **PARDO-MARTÍNEZ, R.**, OLMEDO-COBO, J.A. & ALBA-SÁNCHEZ, F. (2023). Europe's southernmost interglacial refugia as sentinels for the local extinction of mountain conifers. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 313, 104877. DOI: 10.1016/j.revpalbo.2023.104877

Aunque el objeto de estudio principal de la investigación es *A. pinsapo*, el estudio pedoantracológico desarrollado a lo largo de estos últimos años ha posibilitado el descubrimiento de otros taxones de gran importancia paleobiogeográfica. En este apartado destaca *P.* tipo *nigra/sylvestris*, un grupo taxonómico actualmente ausente en el conjunto de la Serranía de Ronda. Estos resultados, junto a los obtenidos para *A. pinsapo*, confirman el papel que determinados relieves montañosos del sector suroccidental de la Cordillera Bética desempeñaron como refugios postglaciales para diferentes taxones de coníferas de montaña.

Este trabajo ha sido publicado en *Review of Palaeobotany and Palynology*, revista científica internacional de la editorial Elsevier donde se incluyen investigaciones que cubren diferentes campos de la paleobotánica.

Su índice de impacto en JCR en 2021 era 2.493, situándose en el cuartil 1 (Q1) en la categoría Paleontology.

En SJR, el índice de impacto en 2021 era de 0.7, siendo cuartil 1 (Q1) en la categoría Paleontology,

6. **PARDO-MARTÍNEZ, R.**, OLMEDO-COBO, J.A., GÓMEZ-ZOTANO, J. & ALBA-SÁNCHEZ, F. (2023). Multiproxy analysis for the paleobiogeographical reconstruction of the relict forests of the Serranía de Ronda during the Holocene (Baetic System, Spain). *The Holocene*. DOI: 10.1177/09596836231185835

La identificación taxonómica de los fragmentos carbonizados hallados en el transcurso de la presente investigación ha posibilitado que, junto al descubrimiento de antiguas poblaciones perteneciente al género *Abies*, se hayan podido reconocer otros taxones de gran interés paleoecológico en el conjunto del ámbito de estudio. Ello ha permitido que, por vez primera, se haya podido llevar a cabo una reconstrucción preliminar de la dinámica que ciertas formaciones boscosas pudieron experimentar durante el Holoceno.

Los resultados de este trabajo han sido publicados en *The Holocene*, revista internacional de la editorial SAGE en la que se incluyen aquellas investigaciones dedicadas al estudio de todos aquellos procesos ambientales, tanto naturales como inducidos por el ser humano, que hayan tenido lugar en los últimos 12 000 años.

Su índice de impacto en JCR en 2022 era 2.4, quedando incluida en el cuartil 2 (Q3) en la categoría Geography, Physical.

Por su parte, el índice de impacto SJR en 2022 se situaba en 1.025, clasificándose en el cuartil 1 (Q1) en áreas como Ecology o Earth-Surface Processes.

7. GÓMEZ-ZOTANO, J., **PARDO-MARTÍNEZ, R.** & OLMEDO-COBO, J.A. (2023). Caracterización paleobiogeográfica de la Sierra del Tablón (Serranía de Ronda, España). *Bosque*, 44(2), 339–352. DOI: 10.4067/S0717-92002023000200339

De entre el amplio número de localidades muestreadas en el presente proyecto de tesis se encuentra la Sierra del Tablón, estribación montañosa que constituye el extremo septentrional del ámbito de estudio, dentro del límite provincial de Sevilla. Aunque el registro pedoantracológico no ha mostrado presencia histórica de *A. pinsapo* en dicho macizo, los datos han revelado información de gran importancia desde el punto de vista de la paleoecología de ciertos géneros de coníferas. Es el caso de *Pinus*, taxón actualmente ausente en la Sierra del Tablón que ha sido identificado a partir del análisis pedoantracológico, mostrando la cronología más antigua obtenida hasta el momento con 14 013-13 440 años cal BP. Una información esencial que permite teorizar acerca del papel que este relieve pudo haber desempeñado en el pasado para determinados pinares altimontanos, y da mayor consistencia a los resultados obtenidos en otras localizaciones montañosas del ámbito de estudio respecto al papel que pudieron haber desempeñado como refugios postglaciales para ciertas coníferas.

Este manuscrito ha sido publicado en “Bosque”, revista de Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales (Universidad Austral de Chile). Sus números incluyen trabajos

relacionados con el bosque en su sentido más amplio, destacando la gestión y producción de los recursos forestales, la silvicultura, la ecología forestal o la conservación de los recursos naturales.

En 2022, el índice de impacto JCR de Bosque era de 0.6, incluyéndose en el cuartil 4 (Q4) de revistas pertenecientes a la categoría Forestry.

En SJR, esta revista tenía un factor de impacto de 0.201 en 2022, clasificándose en el cuartil 3 (Q3) en el ámbito Forestry.

4.2. Publicaciones no indexadas con un índice de calidad relativo

Junto a las publicaciones anteriormente señaladas, desarrolladas una vez que la investigación presentaba cierto grado de madurez, también destaca la realización de un estudio de carácter geográfico en una de las montañas más singulares del ámbito de estudio: la marmórea Sierra Blanca de Igualeja. Los resultados de este trabajo se publicaron en *Takurunna*, revista que agrupa los resultados de todas aquellas investigaciones que se llevan a cabo en la Serranía de Ronda. No obstante, este estudio no ha sido considerado como parte de los resultados del proyecto de tesis por dos motivos fundamentales: (1) El candidato a doctor ocupa la tercera posición en el orden de autoría, no siendo este un puesto relevante según los requisitos establecidos por el Programa de Doctorado en Ciudad, Territorio y Planificación Sostenible, y (2) La publicación no está indexada con un índice de calidad relativo.

A pesar de ello, el artículo en cuestión sí constituye una publicación derivada de la presente investigación, siendo su referencia la siguiente:

- GÓMEZ-ZOTANO, J., OLMEDO-COBO, J.A. & **PARDO-MARTÍNEZ, R.** (2019). Aproximación geográfica a la Sierra Blanca de Igualeja (Serranía de Ronda). *Takurunna. Anuario de estudios sobre Ronda y la Serranía*, 8-9, 25-50.

4.3. Libros y capítulos de libros

Además de los artículos publicados en revistas científicas indicados en el apartado anterior, del presente proyecto de tesis se derivan los siguientes capítulos de libro:

- **PARDO-MARTÍNEZ, R.**, OLMEDO-COBO, J.A. & GÓMEZ-ZOTANO, J. (2020). La pedoantracología como fuente para la reconstrucción paleobiogeográfica de los abetales en la Serranía de Ronda: resultados preliminares. En Carracedo, V., García-Codron, J.C., Garmendia, C., Rivas, V. (Eds.), *Conservación, Gestión y Restauración de la Biodiversidad* (pp. 621–630). Asociación de Geógrafos Españoles (AGE). ISBN: 978-84-09-21838-7
- OLMEDO-COBO, J.A., GÓMEZ-ZOTANO, J., CUNILL-ARTIGAS, R. & **PARDO-MARTÍNEZ, R.** (2021). Dinámica ecológica de los pinares resineros en Sierra Bermeja

durante el Holoceno medio. En Gómez Zotano, J. & Olmedo Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 351–374). Editorial La Serranía. ISBN: 978-84-15588-35-1

- **PARDO-MARTÍNEZ, R.**, OLMEDO-COBO, J.A. & GÓMEZ-ZOTANO, J. (2021). Distribución de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss.: nuevas aportaciones desde la paleobiogeografía para la conservación de un abeto mediterráneo relicto en peligro de extinción. En Gómez Zotano, J. & Olmedo Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 183–210). Editorial La Serranía. ISBN: 978-84-15588-35-1
- **PARDO-MARTÍNEZ, R.**, OLMEDO-COBO, J.A. & GÓMEZ-ZOTANO, J. (2021). Análisis diacrónico de los bosques de la Sierra del Tablón (Sierra Sur de Sevilla). En Gómez Zotano, J. & Olmedo Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 531–542). Editorial La Serranía. ISBN: 978-84-15588-35-1

Mención especial merece la reciente participación como coautor del volumen III, dedicado al periodo Holoceno, del libro titulado Paleoflora y Paleovegetación Ibérica, una extensa obra coordinada por José Sebastián Carrión García que ahonda en la literatura paleobotánica de Iberia. A continuación, se detalla la referencia completa a la citada publicación:

- CARRIÓN, J.S., MUNUERA, M., OCHANDO, J., LÓPEZ-SÁEZ, J.A., CASAS-GALLEGU, M., GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P., BADAL, E., PÉREZ-DÍAZ, S., CARRIÓN-MARCO, Y., JIMÉNEZ-MORENO, G., LÓPEZ-MERINO, L., BURJACHS, F., ABELSCHAAD, D., FERNÁNDEZ, S., MORALES-MOLINO, C., ALBA SÁNCHEZ, F., PEÑACHOCARRO, L., BARRÓN, E., POSTIGO-MIJARRA, J.M., GIL-GARCÍA, M.J., RUBIALES, J.M., VIDAL-MATUTANO, P., ARANBARRI, J., RAMOS-ROMÁN, M.J., CAMUERA, J., MAGRI, D., REVELLES, J., ALTOLAGUIRRE, Y., RUIZ-ZAPATA, B., LUELMO, R., UZQUIANO, P., ALLUÉ, E., ANDERSON, S., DUPRÉ, M., GIL-ROMERA, G., PIQUÉ, R., GARCÍA-ANTÓN, M., AMORÓS, G., YLL, R., PÉREZ-JORDÁ, G., SCOTT, L., FIGUEIRAL, I., RODRÍGUEZ-ARIZA, M.O., MORLA-JAURISTI, C., GARCÍA-AMORENA, I., MONTOYA, E., VAL-PEÓN, C., EJARQUE, A., RIERA, S., PEÑALBA, C., FIERRO, E., EXPÓSITO, I., PÉREZ-OBÍOL, R., VIEIRA, M., GÓMEZ-MANZANEQUE, F., MALDONADO, J., LEUNDA, M., FRANCO, F., ALBERT, R.M., DÍEZ, M.J., MARÍN-ARROYO, A.B., MANZANO, S., DIRITA, F., ANDRADE, A., PARRA, I., ZAPATA, L., PÉREZ, A., GRAU, E., ALCOLEA, M., MESA-FERNÁNDEZ, J.M., MIRAS, Y., RUIZ-ALONSO, M., GÉNOVA, M., GARCÍA-ALVAREZ, S., MORENO, E., OLMEDO-COBO, J.A., GÓMEZ-ZOTANO, J., **PARDO-MARTÍNEZ, R.**, MAS, B., MONTEIRO, P., ANTOLÍN, F., OBEA, L., MARTÍN-SEIJO, M., ALONSO, N., AMORÓS, A., FERNÁNDEZ-DÍAZ, M., REYES, P.P., SÁNCHEZ-GINER, V., GÓMEZ-RODRÍGUEZ, M., RULL, V., VEGAS-VILLARRÚBIA, T., LÓPEZ-BULTÓ, O., BIANCO,

S., TRAPOTE, M.C., PICORNELL-GE-LABERT, L., SUREDA, P., GARCÉS, S., CAMARÓS, E., BRISSET, E., SERVERA-VIVES, G., GIRONA, A., CELANT, A., MICHELANGELI, F., SÁNCHEZ-MORALES, M., CELMA, M., TEIRA, L., CUETO, M., LÓPEZ-DORIGA, I. (2022). *Paleoflora y Paleovegetación Ibérica III: Holoceno*. Ministerio de Ciencia e Innovación y Fundación Séneca, Murcia.

Dicho volumen incluye, asimismo, tres capítulos en los que el candidato a doctor participa como autor o coautor. Son los siguientes:

- GÓMEZ-ZOTANO, J., OLMEDO-COBO, J.A., CUNILL-ARTIGAS, R. & **PARDO-MARTÍNEZ, R.** (2022). Palmitera 1. En Carrión, J.S. (Coord.), *Paleoflora y Paleovegetación Ibérica III: Holoceno* (pp. 827–831). Ministerio de Ciencia e Innovación y Fundación Séneca. ISBN: 978-84-09-44691-9
- OLMEDO-COBO, J.A., GÓMEZ-ZOTANO, J. & **PARDO-MARTÍNEZ, R.** (2022). Los Reales. En Carrión, J.S. (Coord.), *Paleoflora y Paleovegetación Ibérica III: Holoceno* (pp. 695–701). Ministerio de Ciencia e Innovación y Fundación Séneca. ISBN: 978-84-09-44691-9
- **PARDO-MARTÍNEZ, R.**, OLMEDO-COBO, J.A. & GÓMEZ-ZOTANO, J. (2022). Puerto de los Valientes. En Carrión, J.S. (Coord.), *Paleoflora y Paleovegetación Ibérica III: Holoceno* (pp. 901–905). Ministerio de Ciencia e Innovación y Fundación Séneca. ISBN: 978-84-09-44691-9

4.4. Comunicaciones y ponencias

Durante el transcurso de esta investigación se han expuesto, en diferentes congresos de carácter científico, las siguientes comunicaciones y ponencias:

- OLMEDO-COBO, J.A., **PARDO-MARTÍNEZ, R.** & GÓMEZ-ZOTANO, J. (2020). *Nuevos datos sobre la composición de los bosques holocenos en el Parque Natural Sierra de las Nieves (Serranía de Ronda, España) a partir del análisis pedoantracológico*. XI Congreso Español y I Congreso Iberoamericano de Biogeografía – Conservación, gestión y restauración de la biodiversidad. Santander (España), 22 al 25 de junio de 2020. Universidad de Cantabria. Asociación Española de Geografía.
- **PARDO-MARTÍNEZ, R.**, OLMEDO-COBO, J.A. & GÓMEZ-ZOTANO, J. (2020). *La pedoantracología como fuente para la reconstrucción paleobiogeográfica de los abetales en la Serranía de Ronda: resultados preliminares*. XI Congreso Español y I Congreso Iberoamericano de Biogeografía – Conservación, gestión y restauración de la biodiversidad. Santander (España), 22 al 25 de junio de 2020. Universidad de Cantabria. Asociación Española de Geografía.
- **PARDO-MARTÍNEZ, R.**, GÓMEZ-ZOTANO, J. & OLMEDO-COBO, J.A. (2021). *Reconstrucción paleobiogeográfica de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. durante el*

Holoceno en el sur de España a partir del análisis pedoantracológico. VI Jornadas Doctorales de la Universidad de Murcia. Murcia (España), 29 al 31 de mayo de 2021. Universidad de Murcia. Escuela Internacional de Doctorado.

- **PARDO-MARTÍNEZ, R., GÓMEZ-ZOTANO, J., OLMEDO-COBO, J.A. & ALBA SÁNCHEZ, F.** (2021). *Análisis multiproxy para la reconstrucción paleobiogeográfica de los bosques de la Serranía de Ronda (Cordillera Bética, España)*. XXVII Congreso de la Asociación Española de Geografía – Geografía, Cambio Global y Sostenibilidad. La Laguna (España), 14 al 17 de diciembre de 2021. Universidad de La Laguna. Asociación Española de Geografía.
- **PARDO-MARTÍNEZ, R., GÓMEZ-ZOTANO, J. & OLMEDO-COBO, J.A.** (2022). *Reconstrucción paleobiogeográfica de *Abies pinsapo* en la Serranía de Ronda a través del análisis pedoantracológico*. II Congreso Iberoamericano de Biogeografía y XII Congreso Español de Biogeografía - La naturaleza atlántica: hábitats, patrimonio y vulnerabilidad. Pola de Somiedo (España), 5 al 8 de junio de 2022. Universidad de Oviedo. Asociación Española de Geografía.
- **PARDO-MARTÍNEZ, R.** (2022). *Descubriendo los bosques del pasado en la Serranía de Ronda mediante el método pedoantracológico (análisis de los carbones)*. Congreso Internacional de Geografía de la Serranía de Ronda. Ronda (España), 17 al 20 de noviembre de 2022. Instituto de Estudios de Ronda y la Serranía y Real Maestranza de Caballería de Ronda.

4.5. Otros resultados derivados de la investigación

A continuación, se muestran otros resultados derivados de la presente investigación, que se suman a los 7 capítulos que articulan el apartado de resultados. Es importante señalar que los mismos no forman parte del cuerpo de publicaciones de este proyecto de tesis, ya que, aunque actualmente no se encuentran publicados, próximamente serán enviados a la revista internacional *Fire Ecology*. No obstante, y dada su importancia, se ha considerado oportuno incluirlos como resultados de este ensayo. Concretamente, se trata del capítulo titulado:

- *Abies pinsapo* e incendios forestales: una larga historia de supervivencia a eventos extremos en Sierra Bermeja (SO Cordillera Bética). Las conclusiones de este trabajo han permitido confirmar el papel que los incendios forestales, tanto prehistóricos como de época reciente, ha desempeñado en la configuración del paisaje vegetal de Sierra Bermeja. De hecho, el fuego podría haber sido el responsable de la extinción local del pinsapo en determinadas localizaciones de Sierra Bermeja, tal y como sugiere la identificación de varios fragmentos de carbón pertenecientes al género *Abies* en lugares en las que actualmente este taxón no está presente. Este hecho, unido a constatada intensificación de los incendios forestales en las últimas décadas, informa

de la necesidad de otorgar un mayor grado de protección ambiental a esta singular montaña, como podría ser su inclusión en la Red de Parques Nacionales de España.

BLOQUE II

MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO



5. MARCO CONCEPTUAL

5.1. Consideraciones de partida

La consecución del objetivo principal de la presente investigación pasa por conocer la distribución pasada del paleoendemismo *Abies pinsapo* a través del análisis pedoantracológico. Inherentes a este propósito aparecen diferentes términos con caracteres diferenciales propios que emanan de un contexto genérico, como es el de la Geografía. Esta ciencia se caracteriza por su carácter holístico, lo que supone una visión integral e interdependiente del espacio terrestre y los componentes que forman parte de este (Mayhew, 2010; Johnston, 2023). No obstante, la consecución de una perspectiva integrada pasa por analizar de forma individualizada cada uno de los elementos que conforman un determinado sistema espacial. Extrapolado a un ensayo concreto, como el que aquí se presenta, dicho análisis requiere que se definan, de forma inequívoca, los principales ejes conceptuales a partir de los cuales pivota la investigación.

Términos como *A. pinsapo*, biogeografía, paleobiogeografía o pedoantracología constituyen el núcleo conceptual de la investigación.

5.2. Aproximación conceptual

5.2.1. *Abies pinsapo*

A. pinsapo –específicamente *A. pinsapo* Boiss– constituye el objeto de estudio principal de la investigación. Desde el punto de vista taxonómico, y siguiendo un orden descendente, el pinsapo se clasifica de la siguiente manera:

- Reino: Plantae.
- División: Pinophyta.
- Clase: Pinopsida.
- Orden: Pinales.
- Familia: Pinaceae.
- Subfamilia: Abietoideae.
- Género: *Abies*.
- Especie: *Abies pinsapo* Boiss.

El pinsapo pertenece al grupo de las gimnospermas. Etimológicamente, este concepto se divide en dos partes: (1) *gymnos*, que significa “desnudo”; y (2) *sperma*, que alude a “semilla”. Por tanto, se trata de organismos vegetales cuyas semillas están desnudas, es decir, con óvulos al descubierto, no el interior de ovarios (Ruiz de la Torre, 2013).

Las gimnospermas son plantas vivaces sin flores que presentan una distribución cosmopolita. No obstante, aunque pueden ocupar cualquier parte del globo, predominan en ambientes fríos, como la taiga, bioma representado por el enorme cinturón de coníferas que se extiende al norte de Europa, China, Canadá y Alaska (Frelich, 2020).

Asimismo, son plantas muy antiguas, siendo los primeros organismos vegetales que fueron capaces de producir semillas. Se estima que se originaron a finales del Carbonífero (hace unos 300 millones de años). Desde entonces se han contado unas 10 000 especies, quedando actualmente alrededor de 1000, dentro de las cuales aparecen representadas especies con portes que van desde el rastrero hasta el arbóreo. En este último, además, se incluye a la secuoya roja (*Sequoia sempervirens*), que constituye el ser vivo más alto del planeta, más de 115 metros de altura (Bordino, 2022).

Comúnmente, a la división pinophyta (pinofita) se la conoce como coníferas. Estas tienen madera sin vasos verdaderos que permitan el transporte de líquidos. En su lugar poseen traqueidas, estructuras microscópicas en forma de tubos con apariencia de bisel que actúan como tejidos conductores (Schoch et al., 2004). La fecundación tiene lugar a partir de la emisión de un grano de polen que, ayudado por el viento (anemofilia), es transportado desde el cono masculino hasta la superficie del cono floral femenino, donde se encuentra el óvulo (Arista, 1993).

Incluido en esta categoría aparece el pinsapo, conífera de carácter relictivo que presenta un área de distribución muy reducida y fragmentada. Forma parte del elenco de abetos mediterráneos que vegeta las montañas que circundan geográficamente el mar Mediterráneo. Además, es el único abeto mediterráneo que habita de forma natural en el sur de la península ibérica (López-Quintanilla, 2013). Es importante señalar que, si bien ciertos autores han considerado a *Abies maroccana* y *Abies tazaotana* como subespecies de *A. pinsapo*, los últimos estudios genéticos han constatado que este último, aunque estrechamente relacionado con sus parientes africanos, es una especie independiente (Dering et al., 2014) (Figura 3). En consecuencia, tanto *A. maroccana* como *A. tazaotana*, así como sus áreas de distribución, quedan al margen de esta investigación.

El nombre común del pinsapo procede de *pinus-sapinus*, que quiere decir pino-abeto (debido a su enorme similitud y relación genética con *Abies alba*). Esta denominación clásica contiene dos veces la base *pinus*. En el ámbito de la Serranía de Ronda, a este abeto se le conoce comúnmente como pino pinsapo, cuya designación contiene hasta tres veces la raíz anteriormente señalada.

El pinsapo se erige como un árbol de talla media o elevada, pudiendo alcanzar los 25-30 metros de altura. Suele presentar una copa cónica, especialmente en los individuos jóvenes, la cual va adquiriendo un porte más redondeado y arqueado con el tiempo (Herrera et al., 2001). Son relativamente comunes los ejemplares de color glauco, árboles cuyas acículas adquieren una tonalidad verde claro azulado. Estas hojas aciculares presentan un aspecto grueso, rígido

y prácticamente perpendicular a la rama en la cual se inserta. Las acículas pueden permanecer en el árbol hasta 15 años, si bien lo más común es que esta duración sea de entre 11 y 13 años. Las flores masculinas, cuando se desarrollan, presentan un color púrpuro, tornándose en pardo tras la polinización (Arista, 1993). Por su parte, los conos femeninos son verdes durante su desarrollo, adquiere una coloración pardo-verdosa en la fecundación. Las piñas son más o menos cilíndricas, sin punta prominente ni afilada. Su color varía desde el gris-azulado y gris-verdoso de las primeras etapas, hasta el pardo de la madurez. El piñón presenta forma triangular, de perfil aristado y con un ala membranosa de gran anchura. La floración se produce de abril a mayo, mientras que la maduración de los piñones tiene lugar en septiembre u octubre de ese mismo año. Una vez que la semilla ha madurado se produce la desintegración de la piña. La abundancia de frutos se encuentra directamente relacionada con el ciclo meteorológico del año anterior a de la floración (Ruíz de la Torre, 2013).

Figura 3. Detalle de las acículas de *A. pinsapo* (izquierda) y *A. maroccana* (derecha).



Fuentes: autoría propia (izquierda) y EUFORGEN (derecha).

Su actual área de distribución se restringe exclusivamente a la Serranía de Ronda (Blanco et al., 1997; Linares & Carreira, 2006). Incluye tres poblaciones principales: el pinsapar del Parque Nacional de la Sierra de las Nieves, ligado administrativamente a los términos municipales de Ronda, Tolox y Yunquera, cuyos individuos crecen sobre sustratos eminentemente calizos entre los 1000 y 1800 m s.n.m.; el pinsapar de la Sierra del Pinar (Parque Natural de la Sierra de Grazalema), dentro del término municipal de la localidad homónima, el cual habita sobre calizas liásicas y jurásicas en un rango altitudinal que va desde los 1000 a los 1650 m s.n.m.; finalmente, el pinsapar del Paraje Natural de los Reales de Sierra Bermeja, en los términos de Genalguacil, Estepona y Casares, desarrollado entre los 1300 y 1400 m s.n.m. sobre peridotitas, siendo la única formación vegetal dominada por *A. pinsapo* a nivel mundial que crece sobre este tipo de sustrato (Gómez-Zotano, 2003, 2004; Gutiérrez-Hernández et al., 2017).

Este abeto presenta un marcado carácter helioxerófilo, circunstancia que le permite tolerar periodos de calor y sequía relativamente prolongados (Fernández-Cancio et al., 2007). Es por ello que, para compensar el déficit pluviométrico que suele acompañar al estío mediterráneo,

generalmente opta por las exposiciones umbrías, vegetando laderas de media y elevada altitud (pisos bioclimáticos mesomeditarráneo superior y supramediterráneo) bajo ombroclimas húmedo e hiperhúmedo (Navarro-Cerrillo et al., 2013; Gutiérrez-Hernández et al., 2017). Sin embargo, puede alcanzar los márgenes de los arroyos en el fondo de los barrancos, ocupando cotas altitudinales inferiores a 500 m s.n.m (Navarro-Cerrillo et al., 2006; Valladares, 2009).

Asimismo, dentro de las condiciones mesoclimáticas que caracterizan su área natural de distribución, la nieve es un meteoro relativamente frecuente, especialmente en las cotas más elevadas, si bien este fenómeno no constituye un factor mesológico determinante para la especie. El viento, por el contrario, sí parece tener mayor importancia, por lo que es poco habitual que el pinsapo ocupe las cimas más significativas de las montañas rondeñas, donde deja paso a sabinas y vegetación espinosa de tipo almohadillado (Valladares, 2009; Navarro-Cerrillo et al., 2013).

Como especie principal constituye un tipo de bosque estable que puede ser considerado como climácico en sus áreas relicticas (López-Quintanilla, 2013). Todas sus poblaciones incluyen diferentes especies asociadas, como *Daphne laureola*, *Paeonia coriácea*, *Helleborus foetidus*, *Acer monspessulanum* o *Sorbus aria*. Sobre sustratos carbonatados, como las calizas, taxones como *Juniperus sabina*, *Juniperus communis* y *Quercus alpestris* acompañan al pinsapo en el límite superior de su distribución; mientras que *Juniperus phoenicea*, *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*, *Ceratonia siliqua* y *Chamaerops humilis* hacen lo propio en el límite inferior (Valladares, 2009).

Asimismo, el pinsapo es un árbol muy importante desde el punto de vista funcional, contribuyendo positivamente al equilibrio hidrológico de los ecosistemas y favoreciendo la estabilidad de las laderas mediante la protección del suelo frente a la erosión (Sánchez-Salguero, 2007). Aunque, sin duda, son su carácter endémico y relictico, junto a su excepcional valor estético y social, sus principales atributos (López-Quintanilla, 2013; Navarro-Cerrillo et al., 2013).

Es por ello por lo que cualquier tentativa que tenga por objeto la conservación de este singular abeto quedaría totalmente justificada. Esta premisa, aplicable para su rango actual de distribución, se podría extender al conjunto de hábitats potenciales de la especie, pudiendo llevarse a cabo actuaciones de reintroducción de la especie en aquellos nichos ecológicos potenciales determinados por estudios fitosociológicos, MDE y aproximaciones de carácter paleobiogeográfico (Olmedo-Cobo et al., 2017). No obstante, la reintroducción del pinsapo debería quedar restringida a los enclaves en los que se haya demostrado que su desaparición obedeció a factores puramente antrópicos.

5.2.2. Biogeografía

Antes de ahondar en el significado de Biogeografía, es importante señalar que este concepto no presenta una definición unánime, entre otros motivos porque esta ciencia suele ser

considerada como una disciplina situada a caballo entre la biología y la geografía, de las cuales se nutre en muchos aspectos, como el epistemológico (Meave & Martínez, 2002). Buena prueba de ello la encontramos en la definición que la propia RAE (Real Academia Española) propone de esta disciplina: “Parte de la biología que se ocupa de la distribución geográfica de animales y plantas”. La misma comienza afirmando que, efectivamente, la Biogeografía emana de la Biología, si bien el análisis de la distribución geográfica –en este caso de plantas y animales– constituye el eje central de la disciplina. Este análisis, el de la distribución geográfica, alberga en su matriz términos propios de la Geografía, tales como espacio, territorio, paisaje o medio. Por tanto, resulta totalmente pertinente considerar a la Geografía, y a sus métodos, como partes fundamentales a la hora de llevar a cabo cualquier tipo de estudio biogeográfico.

En términos generales, se puede afirmar que esta ciencia constituye una rama de la Geografía Física. Su análisis se centra en el estudio de los componentes bióticos del medio físico y cómo estos se relacionan y están en constante interacción con el resto de elementos –bióticos y antrópicos– que conforman el sistema (Bejarano-Palma & Rubio-Recio, 1999).

Otras definiciones de Biogeografía, las cuales evidencian la diversidad y subjetividad de este concepto, serían las siguientes:

- Pierre Dansereau (1957): “La biogeografía estudia el origen, la distribución, las adaptaciones y la asociación de plantas y animales”.
- Raymond Furon (1958): “El estudio de la distribución y situación geográfica de los seres vivos, pertenece al campo de la biogeografía”. El mismo autor también hace referencia a que la Biogeografía “es la ciencia que estudia el reparto de los seres vivos en la superficie de los continentes y en el seno de los océanos, además de las causas de este reparto en el espacio y en el tiempo”.
- Josef Schmithüsen (1959): “La investigación geográfica que estudia y describe la vegetación de la tierra en su significación para la caracterización de las regiones (...), el objeto de estudio son las regiones, los paisajes y su contenido de vegetación”.
- Alain Lacoste y Robert Salanon (1973): “Es la ciencia que describe y explica las causas que rigen la forma en que se distribuyen los animales y las plantas en el planeta”.
- Ramón Margalef (1974): “El estudio de los fenómenos biológicos en sus manifestaciones espaciales”.
- Jaques Blondel (1986): “Estudio espacio-temporal de las diversidades biológicas y de su regulación en los medios heterogéneos y cambiantes”.
- Mario Zunino y Aldo Zullini (2003): “Estudio de los aspectos espaciales y espacio-temporales de la biodiversidad; ciencia que estudia a dimensión espacial de la evolución biológica”.

- Enrique Sanchis et al. (2004): “Es un vocablo derivado de la geografía con una clara argumentación o base biológica (...) que trata de la distribución de los seres vivos en nuestro planeta”.
- Mark Lomolino et al. (2005): “Ciencia que intenta documentar y comprender los modelos espaciales de la diversidad biológica”.
- Salvador Rivas (2005): ““Es la ciencia que estudia la distribución de las especies y la biocenosis sobre la Tierra, teniendo en cuenta las áreas de taxones y sintaxones, así como información de otras ciencias de la naturaleza para tratar de establecer una tipología de los territorios del planeta”.

Dentro de la Biogeografía se pueden encontrar varias subdisciplinas, siendo las más importantes la Zoogeografía y la Fitogeografía. La primera, en palabras de Muller (1979), “estudia las características faunísticas de paisajes y regiones, la evolución y dinámica actual de las áreas de distribución de los animales y las relaciones recíprocas entre dichas áreas y la especie humana”; mientras que la segunda “trata de la descripción, interpretación y predicción de tipos de distribución de comunidades, poblaciones, especies u otras unidades botánicas que puedan observarse en niveles de integración comparables, en el espacio y en el tiempo (Wiegand, 1989).

El pinsapo, como elemento botánico, constituye el eje central de este proyecto de tesis. Por tanto, y a raíz de lo anteriormente señalado, se deduce que esta investigación posee un marcado carácter fitogeográfico.

La importancia de los estudios fitogeográficos se sustenta, en primer lugar, porque la vegetación representa el elemento más evidente del medio geográfico, siendo el reflejo de las características biofísicas del medio (clima, suelo, litología, fauna, etc.). Asimismo, los mapas de vegetación son esenciales para llevar a cabo una adecuada gestión del territorio. El estudio de la componente vegetal es imprescindible para aprender cómo reaccionan los organismos florísticos frente a su medio ambiente. Además, su conocimiento es imprescindible para solucionar problemas relativos a: 1) Conservación (de especies relictas amenazadas que actualmente se encuentran en peligro de extinción, como el pinsapo); 2) Uso sostenible del territorio (priorizando la vegetación frente a otros usos como fórmula para alcanzar el equilibrio en el aprovechamiento territorial); 3) Restauración (mediante un conocimiento completo del ecosistema potencial que permita desarrollar proyectos de recuperación apropiados); 4) Agronomía (a través de la introducción de cultivos asociados-relacionados con la vegetación natural); y 5) Forestación y silvicultura (un profundo conocimiento de los caracteres mesológicos de las especies posibilita una mejor toma de decisiones) (Alcaraz et al., 1999; Ladle & Whittaker, 2011).

En definitiva, se puede concluir con que el objetivo principal de la biogeografía radica en la descripción y el análisis, en términos causales, de la distribución de los seres vivos en el planeta. Esta distribución contempla tanto su dimensión actual como su devenir histórico. Se

habla entonces de paleobiogeografía, disciplina que se ayuda o apoya en otras ciencias paleoecológicas para comprender las circunstancias y factores de carácter histórico que ayudan a explicar la distribución presente de los seres vivos.

5.2.3. Paleobiogeografía

La paleobiogeografía alude al estudio de la distribución geográfica de la fauna y la flora en el pasado. Esta disciplina se puede dividir en paleozoogeografía y paleofitogeografía, ocupándose la primera de la fauna y la segunda de la flora (Middlemiss, 1979).

Esta última permite reconstruir las dinámicas experimentadas por la cubierta vegetal a diversas escalas espaciales y temporales. Para ello se sirve de diferentes archivos y señales, entre los cuales destacan el polen y las esporas fósiles. Ambos constituyen el cuerpo de análisis principal de la palinología, metodología que iniciaría su andadura en el panorama científico a partir de los estudios realizados por Von Post en Escandinavia durante los años 20 del pasado siglo (Islebe, 1999).

Otros testimonios que posibilitan la reconstrucción de ambientes pasados son, por ejemplo, el empleo de macrofósiles, moluscos y foraminíferos. Estos últimos son relativamente abundantes en el registro fósil, constituyendo un recurso fundamental para estudiar la historia ambiental, climática y paisajística de nuestro planeta (Calonge et al., 2001).

En las últimas décadas, las metodologías cuyo objeto de estudio es el análisis de los cambios paleoambientales han experimentado un desarrollo notable. Según Alba-Sánchez & López-Sáez (2013), estas técnicas se pueden agrupar de la siguiente manera:

- Disciplinas relacionadas con las Ciencias de la Tierra: Geomorfología, Sedimentología, Pedología, Geoquímica, Geología isotrópica).
- Disciplinas dedicadas al estudio de la cultura material (Arqueología, Prehistoria).
- Disciplinas de análisis espacial que posibilitan la creación de modelos simplificados de la realidad en función de los atributos seleccionados (Sistemas de Información Geográfica, Teledetección, Geoestadística).
- Disciplinas relacionadas con el registro fósil: Paleontología, Palinología, Copropalinología, Carpología, Zooarqueología, Fitólitos, Antracología, Pedoantracología).

Todas ellas revelan información paleoambiental, paleoclimática y paleobiogeográfica que, de forma articulada y coherente, puede proporcionar las claves fundamentales para caracterizar un ambiente pretérito concreto (Alcalde et al., 2006). No obstante, una condición inherente a cualquier ecosistema es su complejidad (Rincón, 2017). Los constantes procesos, interrelaciones e interdependencias que en él tienen lugar hacen de su comprensión una tarea prácticamente inalcanzable. Esta limitación adquiere mayor importancia cuando se analizan

ecosistemas del pasado. En algunos casos puede ocurrir que no exista ningún tipo de información paleoambiental, o bien que alguna parte de la misma haya sido eliminada. En cualquiera de las dos situaciones, esta escasez de datos en el registro fósil –sea más o menos extensa– dificulta que se puedan obtener señales completas acerca de la composición y funcionamiento de estos ecosistemas, resultando en reconstrucciones paleobiogeográficas parciales (Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013).

En cualquier caso, la utilidad de los estudios paleofitogeográficos a la hora de comprender las causas que explican la distribución presente de los organismos vegetales es manifiesta. Junto al clima, principal factor mesológico a escala regional que determina la existencia de los grandes biomas del planeta Tierra (Woodward & McKee, 1991), también existen otras causas, a escala local, que condicionan la aptitud de un determinado territorio como hábitat potencial para una determinada especie o comunidad florística. Estos últimos incluyen factores geomorfológicos (altitud, pendiente, exposición), factores edáficos, factores hidrológicos y características intrínsecas de los seres vivos interrelaciones entre los mismos. Finalmente, otros factores que ayudan a explicar la distribución de los organismos vegetales, y por extensión, de los seres vivos, son los siguientes: factores humanos, espaciales (distribución de tierras y mares, orografía) y cambios paleoambientales de tipo geológico y climático (Barry et al., 2020; Otero, 2020).

Por tanto, el paisaje vegetal actual es el resultado de un complejo y dilatado proceso dinámico (Willis & Birks, 2006). Durante el mismo, los diferentes componentes ecosistémicos han experimentado multitud de interrelaciones, inducciones y perturbaciones. En esta constante evolución del medio, el ser humano ha desempeñado un papel fundamental, siendo capaz de adaptar el paisaje y modificarlo en función de sus necesidades (Naveh, 1974; Carrión et al., 2007).

En consecuencia, para alcanzar un conocimiento biogeográfico lo más fidedigno como sea posible, es necesario apostar por aproximaciones retrospectivas que permitan cubrir escalas temporales amplias (de miles de años) (Willis et al., 2007). Esta recapitulación, de carácter generalmente multidisciplinar, constituye una fuente de información de enorme importancia paleoecológica. En su conjunto, las señales obtenidas, tras su tratamiento, posibilitan que se puedan reconstruir los ecosistemas forestales del pasado. Al mismo tiempo, proporcionan claves fundamentales acerca de la dinámica temporal experimentada por dichos ecosistemas, pudiendo concretarse si las diferentes perturbaciones ocurridas son de carácter natural, o bien son consecuencia de la acción humana (Alcalde et al., 2006; Willis & Birks, 2006).

Esta información paleoecológica deriva fundamentalmente del registro fósil de los vegetales, cuyas señales principales son los granos de polen, las esporas, las semillas, los frutos, los microfósiles no políticos, los fitolitos y los micro y macrocarbones (Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013). Este último archivo, preservado en los suelos naturales, constituye el objeto de estudio de la metodología pedoantracológica, principal procedimiento metodológico empleado en el presente proyecto de tesis.

5.2.4. Pedoantracología

Las posibilidades a la hora de reconstruir ambientes y condiciones ecológicas pretéritas son múltiples. Como se ha señalado con anterioridad, la palinología se erige como la disciplina con mayor tradición paleoecológica dentro del panorama científico (European Pollen Database, 2023). No obstante, la paleoecología dispone de otra serie de herramientas para rastrear aquellos indicios que informen sobre las dinámicas experimentadas por la vegetación. Dentro de estas encontramos la dendrocronología, la antracología y la pedoantracología. Esta última, al contrario que la palinología, es un campo de estudio con una trayectoria limitada en el ámbito de la paleofitogeografía (ver, por ejemplo, las obras de Carrión, 2012, 2022, en las que la pedoantracología apenas es empleada como método para reconstruir las dinámicas de la vegetación en la península ibérica). Sin embargo, desde hace varios años ha cosechado resultados destacados que permiten desvelar la historia ecológica y biogeográfica de los distintos territorios sobre los que se aplican (Cunill, 2010; Nelle et al., 2013).

Buena prueba de ello son los resultados obtenidos en países como Francia (Talon et al., 1998; Talon, 2010), Portugal (Figueiral & Carcaillet, 2005), Italia (Moser et al., 2017) o España (Beato-Bergua et al., 2019; Cunill et al., 2012, 2013; García-Álvarez et al., 2017; Gómez-Zotano et al., 2017, 2018; Olmedo-Cobo et al., 2019ab), por citar algunos.

En el sur de Iberia, trabajos como los desarrollados por Gómez-Zotano et al. (2017) y Olmedo-Cobo et al. (2017) han permitido reconstruir la paleoecología de *Abies* sp. en Sierra Bermeja durante el Holoceno medio. Los resultados obtenidos sentaron las bases de posteriores investigaciones sobre el pasado de esta singular conífera en diferentes enclaves del sur peninsular. En este sentido, la presente tesis doctoral, cuyo ámbito de actuación comprende el conjunto de la Serranía de Ronda, permite dar continuidad a aquellos trabajos pioneros en materia pedoantracológica en el extremo occidental de la Cordillera Bética.

Pedoantracología y palinología, aunque netamente diferentes desde el punto de vista procedimental, encuentran un punto de encuentro común: la reconstrucción del paisaje vegetal a una escala temporal amplia. No obstante, es importante señalar que el carbón frente al polen presenta la ventaja de asegurar la presencia *in situ* de una especie, lo que no siempre es posible en el segundo caso (Thinon, 1978, 1992). Por tanto, el estudio de los carbones posibilita que se pueda reconstruir con gran precisión espacial la historia de la vegetación leñosa incendiada (Talon et al., 1998; Cunill, 2010).

Precisamente el fuego constituye uno de los principales agentes modeladores del paisaje vegetal a lo largo de la historia, siendo un elemento clave para explicar la gran diversidad de especies del clima mediterráneo (Naveh, 1974, 1975, 1991; Pausas, 2004). Esta intensa actividad incendiaria genera multitud de residuos, que pueden ser tanto gaseosos como sólidos. El carbón es el máximo representante de los últimos. Su génesis puede deberse tanto a una mala combustión como a su transformación de forma voluntaria (Cunill, 2010). Puede encontrarse tanto en contextos arqueológicos como en suelos naturales. En el primer caso, es

la antracología la encargada de su estudio, siendo Unger (1846) quien primero llevase a cabo un estudio de este tipo. Por su parte, la pedoantracología es la encargada de analizar los carbones presentes en suelos naturales. Los primeros estudios en esta materia fueron desarrollados por Thinon (1978). En este caso, las muestras carbonizadas se conservan como registros que no muestran una cronoestratigrafía secuenciada, circunstancia que obliga a datar de forma individualizada cada uno de los fragmentos de carbón que puedan ser de interés para la investigación (Thinon, 1992; Cunill, 2010).

En cualquier caso, el carbón se conserva durante largos periodos de tiempo. Constituye, de esta manera, una gran oportunidad a la hora no solo de reconstruir paisajes vegetales pretéritos, sino también para el estudio de la geografía histórica de los incendios forestales, encontrando un punto de unión con otro tipo de fuentes como el estudio del polen, de los isótopos de plomo y de metales pesados presentes en las turberas o de los carbones sedimentarios, entre otras (Carracedo et al., 2017). Todas estas fuentes, de forma interrelacionada y sinérgica, ayudan a estudiar la dinámica de los paisajes vegetales del pasado con el fin de comprender los hábitats naturales del presente y del futuro.

6. ÁMBITO DE ESTUDIO: DELIMITACIÓN ESPACIOTEMPORAL

6.1. Acerca de la delimitación de la Serranía de Ronda

La delimitación de la Serranía de Ronda ha sido, históricamente, una tarea compleja. Su genérica denominación abarca diferentes ámbitos y escalas, lo que en numerosas ocasiones ha generado que existan importantes imprecisiones de carácter geográfico (Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021).

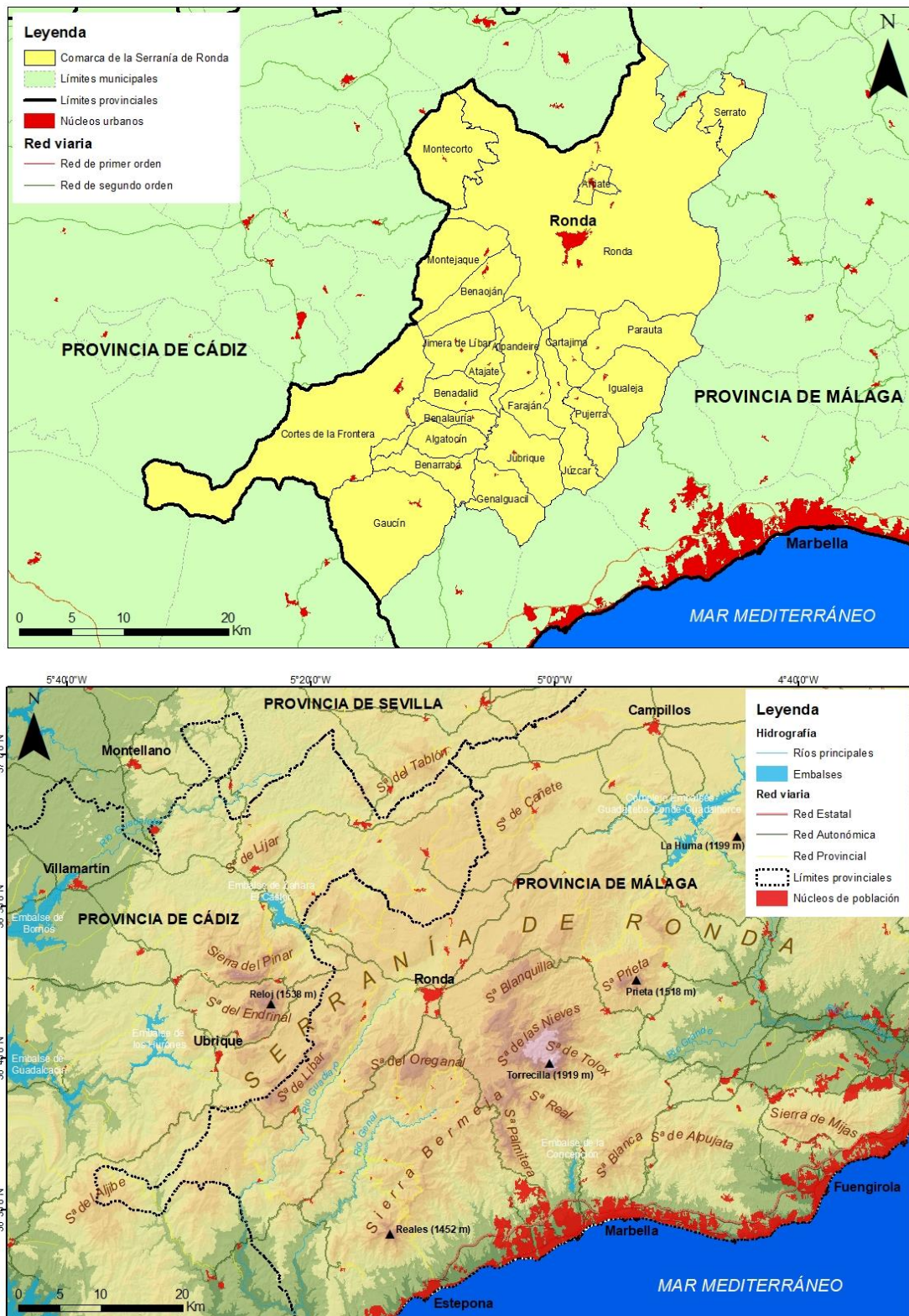
Desde el punto de vista administrativo, la Serranía de Ronda constituye una de las 9 comarcas que conforman la provincia de Málaga (Andalucía, España). Actualmente está constituida por un total de 22 municipios, localizándose la capitalidad comarcal en Ronda, municipio que supera los 36 600 habitantes según el censo de 2021. Por su parte, el total demográfico comarcal asciende a 50 085 habitantes (SIMA, 2023).

Pero esta comarca administrativa solo abarca una porción de la Serranía de Ronda como sistema montañoso que, desde el punto de vista administrativo, queda dividido entre las provincias de Cádiz, Málaga y Sevilla, y entre las comarcas del Campo de Gibraltar, la Sierra de Cádiz, la Costa del Sol Occidental, la Hoya de Málaga, el Valle del Guadalteba, la Sierra de las Nieves y la Sierra Sur de Sevilla.

El sistema montañoso conocido como Serranía de Ronda constituye el extremo occidental de la Cordillera Bética y está delimitado al este por el río Guadalhorce, al sur por el Mar Mediterráneo, al oeste por la campiña de Jerez y al norte por la Depresión del Guadalquivir. Por tanto, los límites de la Serranía de Ronda que se consideran en esta investigación difieren ostensiblemente de su homólogo administrativo, al contemplar tanto la personalidad geográfica como histórica (Figura 4). Cabe señalar que este sistema montañoso constituye un ámbito complejo, que comprende una amplia variedad de sierras, depresiones y valles, litologías y ambientes geocológicos de muy diferente naturaleza que lo convierten en un territorio natural e históricamente muy rico y heterogéneo (Gómez Zotano & Olmedo Cobo, 2021). Su privilegiada localización entre dos masas de agua de diferente naturaleza, como son el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo, y a medio camino entre el continente europeo y África le confieren un carácter estratégico que ha servido de refugio para diferentes taxones de la flora terciaria que habían emigrado de Europa a África, y viceversa (Galán de Mera et al., 2003; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013).

Por ello, el ámbito de trabajo de la presente investigación se centra en esta última delimitación, de carácter geográfico, la cual resulta más oportuna para cumplir satisfactoriamente con los objetivos planteados. Por el contrario, restringir el radio de acción a la delimitación meramente comarcal hubiese resultado insuficiente, ya que la misma excluye multitud de sistemas montañosos que pudieron desempeñar importantes funciones paleoecológicas en el pasado.

Figura 4. Comparativa de los límites de la Serranía de Ronda a nivel administrativo (arriba) y geográfico-histórico (abajo).



Fuente: autoría propia a partir de las capas de información del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.

6.2. Caracterización geográfica de la Serranía de Ronda

Su marcada orografía se manifiesta en un amplio número de elevaciones montañosas salpicadas a lo largo y ancho del territorio (Rodríguez-Martínez, 1977; Gómez-Zotano, 2003, 2004). De norte a sur destacan como relieves montañosos como Sierra del Tablón, Sierra de Huma, Sierra de Líjar, Sierra del Pinar, Sierra del Endrinal, Sierra Blanquilla, Sierra Prieta, Sierra de las Nieves, Sierra del Oreganal, Sierra de Líbar, Sierra de Mijas, Sierra Blanca y Sierra Bermeja, esta última en el extremo suroccidental del ámbito (Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021). Las altitudes oscilan entre prácticamente el nivel del mar de la franja meridional del ámbito que vierte sus aguas al Mar Mediterráneo y los 1919 m s.n.m. del pico Torrecilla, en el Parque Nacional de la Sierra de las Nieves.

Los diferentes sistemas que conforman el medio físico presentan, igualmente, una amplia heterogeneidad en respuesta al gran gradiente altitudinal que encontramos en este ámbito de estudio, pasando desde el piso termomediterráneo en el sector meridional del ámbito, coincidiendo con las altitudes más bajas, hasta el piso oromediterráneo propio de las zonas más elevadas de la Sierra de las Nieves (Pérez-Latorre et al., 2021).

En lo que respecta a precipitaciones, los valores más elevados –superiores a 2000 mm anuales– quedan restringidos al Parque Natural de la Sierra de Grazalema, como respuesta a la descarga pluviométrica que se produce cuando la nubosidad, procedente del Golfo de Cádiz, asciende y se condensa rápidamente hasta encontrarse con la primera zona montañosa con la que se topan los vientos húmedos procedentes del Atlántico (Capel-Molina, 2000; Naranjo-Barea et al., 2017). Los registros pluviométricos descienden de oeste a este, con valores próximos a los 1000 mm en la franja más oriental del ámbito. El mínimo de precipitaciones, con valores del orden de los 800 mm anuales, se circunscribe al sector más septentrional del ámbito, consecuencia de su localización a sotavento de los vientos húmedos atlánticos mencionados anteriormente, conformando de esta manera un ejemplo manifiesto, aunque no extremo, del denominado Efecto Foehn.

De igual forma, las temperaturas varían en función de la altitud. Así, los valores de temperatura media anual (Tma) más elevados se localizan en el extremo sur de la Serranía de Ronda, coincidiendo con las cotas más bajas, con valores que oscilan entre los 16 y 17 °C. El dominio central del ámbito, con altitudes medias de unos 800-1200 m s.n.m. presenta una Tma de 14 °C, restringiéndose los valores más bajos a las cotas más elevadas del Parque Nacional de la Sierra de las Nieves, en cuyos puntos cacuminales la Tma alcanza un valor próximo a los 8 °C (Olmedo-Cobo & Gómez-Zotano, 2016).

El gradiente altitudinal que encontramos en el ámbito de estudio imprime ciertos matices a tener en cuenta dentro de la generalidad del clima mediterráneo. De esta forma, las cotas más elevadas de la Sierra de las Nieves quedarían bajo el influjo de un clima mediterráneo de montaña, donde las condiciones meteorológicas (temperaturas más bajas y mayor pluviometría) redundan de forma directa en las condiciones mesológicas de los seres vivos. Por

el contrario, el extremo más meridional de la Serranía de Ronda, con altitudes por debajo de los 100 m s.n.m. y relativa cercanía a la costa mediterránea, presenta un carácter más litoralizado y, por tanto, menos continental (Olmedo-Cobo & Gómez-Zotano, 2016).

La litología de la Serranía de Ronda, igualmente diversa, está representada por materiales de los tres tipos de rocas fundamentales: sedimentarias, metamórficas e ígneas, que se distribuyen de forma dispar por el territorio (Gómez-Moreno, 2012). En su mayoría, este conjunto fisiográfico está dominado por materiales sedimentarios, concentrándose los de tipo arenas, arcillas y limos –frágiles, tiernas y friables– al norte y oeste del ámbito, coincidiendo con las cuencas de los ríos Guadalteba, Guadalhorce y Grandes, así como al suroeste del ámbito, en torno al valle del río Guadiaro. Las cronologías de estos materiales son relativamente recientes, situándose entre el Mioceno Inferior y el Paleógeno (5.3 y 65 Ma). Las areniscas, rocas de tipo detrítico, se distribuyen fundamentalmente por el suroeste, ocupando buena parte del sector Aljibico del ámbito de estudio, así como por el noreste, donde cierran –especialmente en sus flancos sur, este y suroeste– a la Sierra de Huma, esta última de naturaleza caliza. Las cronologías son del periodo Mioceno, con antigüedades que oscilan entre los 5.3 y 23 Ma. Finalmente, y dentro del grupo de rocas sedimentarias, calizas y dolomías caracterizan litológicamente buena parte de los sistemas montañosos del oeste (Sierra de Lívar, Sierra del Pinar, Sierra del Endrinal y Sierra de Líbar), centro (Sierra del Oreganal, Sierra de las Nieves, Sierra de Tolox, Sierra Blanquilla y Sierra Hidalga) y norte (Sierra del Tablón, Sierra Molina y Sierra de Ortegícar) de la Serranía de Ronda, con antigüedades comprendidas entre los 66 y los 252 Ma (periodos Cretácico y Jurásico, respectivamente) (Serrano-Lozano & Guerra-Merchan, 2004).

El grupo de rocas metamórficas, representado por filitas, gneises, esquistos y mármoles, se localiza hacia el sur y este del ámbito. Estos afloramientos coinciden con las litologías más antiguas del ámbito de estudio, cuyas edades están comprendidas entre los 252 y 541 Ma (era Paleozoica). Dentro de la categoría de macizos marmóreos destacan Sierra Blanca de Marbella (1275 m s.n.m.) y Sierra de Mijas (1150 m s.n.m), los cuales cierran el conjunto rondeño en su flanco suroriental.

Aunque, sin duda, la mayor singularidad geológica de la Serranía de Ronda se encuentra en los macizos ultramáficos de Ronda. De entre todos ellos destaca Sierra Bermeja, uno de los afloramientos de rocas ultramáficas más extensos de todo el mundo, con 300 km² (Gómez-Zotano, 2003, 2004). Concretamente, su litología está representada por peridotitas, rocas procedentes del manto superior terrestre, localizadas entre 30 y 300 km de profundidad (Figura 5).

A nivel biogeográfico nos encontramos en la Región Mediterránea y, dentro de la misma, casi la totalidad del ámbito de estudio se encuentra en la provincia Bética, quedando únicamente el sector suroccidental del mismo incluido en la provincia Tingitano-Onubo-Algarviense. A un nivel mayor de detalle, cuatro son los sectores biogeográficos que se incluyen dentro los límites de

la Serranía de Ronda: Rondeño, Bermejense, Antequerano y Aljábico (Pérez-Latorre et al., 2019, 2021).

Figura 5. Típico afloramiento peridotítico de Sierra Bermeja.



Fuente: José Gómez Zotano.

El sector Rondeño se extiende por el núcleo central de la Serranía de Ronda. Incluye diferentes relieves montañosos de naturaleza esencialmente carbonatada, los cuales aparecen representados por materiales como calizas, margas y dolomías (también kakiritas) (Pérez-Latorre et al., 2021). Su amplio gradiente altitudinal posibilita que se puedan encontrar hasta 4 pisos bioclimáticos: termomediterráneo, mesomediterráneo, supramediterráneo y oromediterráneo. A su vez los ombrotipos presentes van desde el seco hasta el hiperhúmedo. Taxones como *Armeria villosa* subsp. *villosa*, *Galium pulvinatum*, *Saxifraga bourgaeana*, *Linaria platycalix* y *Genista haenseleri* constituyen algunos de los bioindicadores más representativos de este sector (Pérez-Latorre et al., 2021).

Por su parte, el sector Bermejense comprende las denominadas sierras bermejas, constituidas a partir de afloramientos de rocas ígneas ultramáficas como peridotitas y serpentinas (Gómez-Zotano, 2004). Estos materiales, poco frecuentes en la superficie terrestre, son muy ricos en metales pesados, circunstancia que ha condicionado una flora con multitud de edafoendemismos (Gómez-Zotano et al., 2014; Hidalgo-Triana & Pérez-Latorre., 2017). Dentro de este singular catálogo florístico, distribuido través de los pisos termomediterráneo al

supramediterráneo bajo ombrotipos que van desde el seco al hiperhúmedo, especies como *Stahelina baetica*, *Centaurea lainzii*, *Armeria colorata*, *Arenaria capillites* y *Centaurea carratracensis* constituyen bioindicadores de este sector (Pérez-Latorre et al., 2021).

Respecto al sector Antequerano, este se restringe a la zona más septentrional del ámbito de estudio. Su distribución comprende territorios calizo-dolomíticos tanto de la provincia de Málaga como de su homóloga gaditana, incluyendo una amplia superficie que va desde la Depresión de Antequera y sierras nororientales próximas hasta la zona de Olvera-Algodonales-Algámitas. Las condiciones bioclimáticas son las propias de los pisos termomediterráneo y mesomediterráneo, con una pluviometría media anual que determina la existencia de dos ombrotipos: seco y subhúmedo. Especies bioindicadoras de este sector son *Saxifraga reuteriana* y *Cytisus malacitanus* subsp. *moleri* (Pérez-Latorre et al., 2021).

Finalmente, el sector Aljábico ocupa el extremo suroccidental del conjunto rondeño. Litológicamente aparece representado por materiales silíceos, entre los que destacan esquistos y gnesis, si bien ciertas rocas sedimentarias, como areniscas y margas, también participan en esta caracterización del roquedo. Desde el punto de vista bioclimático, las zonas de menor altitud aparecen representadas por condiciones termomediterráneas subhúmedas, mientras que en los relieves montañosos predominan condiciones mesomediterráneas húmedas e hiperhúmedas. Especies como *Teline tribracteolata*, *Echinopartum aljibicum*, *Holcus grandiflorus* y *Odontites foliosus* constituyen algunos de los bioindicadores más destacados (Pérez-Latorre et al., 2021).

La particular localización geográfica de la Serranía de Ronda posibilita una caracterización biogeográfica única. Asimismo, los procesos de antropización han sido continuos desde hace siglos, factores que, en conjunto, han determinado la existencia de un legado forestal muy singular y diverso (Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021).

Ello se traduce en la existencia de hasta seis grupos funcionales de bosques (Tabla 1).

Tabla 1. Grupos funcionales principales en los que se incluyen los bosques de la Serranía de Ronda.

Grupo funcional	Tipos de bosque en la Serranía de Ronda con sus especies más significativas
Bosques siempreverdes	Encinar (<i>Quercus rotundifolia</i>), alcornonal (<i>Quercus suber</i>), acebuchal (<i>Olea europea</i> var. <i>sylvestris</i>), algarrobal (<i>Ceratonia siliqua</i>)
Bosques marcescentes	Quejigales supramediterráneos (<i>Quercus faginea</i> subsp. <i>alpestris</i>), quejigales termomediterráneos basófilos (<i>Quercus faginea</i> subsp. <i>brotero</i>), quejigales termomediterráneos silicícolas (<i>Quercus canariensis</i>), robledales (<i>Quercus pyrenaica</i>), castaños (<i>Castanea sativa</i>)

Bosques de coníferas	Pinares basófilos (<i>Pinus halepensis</i>), pinares serpentínícolos (<i>Pinus pinaster</i>), pinsapares basófilos (<i>Abies pinsapo</i>), pinsapares serpentínícolos (<i>Abies pinsapo</i>)
Bosques caducifolios arbóreos de ribera	Choperas (<i>Populus alba</i>), olmedas (<i>Ulmus minor</i>), alisedas (<i>Alnus glutinosa</i>), fresnedas (<i>Fraxinus angustifolia</i>)
Bosques caducifolios subarbóreos de ribera	Saucedas silícico-basófilas (<i>Salix pedicellata</i>), saucedas serpentínícolas (<i>Salix pedicellata</i>)
Bosques lauroides	Ojaranzales (<i>Rhododendron ponticum</i>)

Fuente: Pérez-Latorre et al. (2021).

Dentro de la riqueza forestal anteriormente referida, destaca la existencia de un taxón arbóreo particularmente relevante desde el punto de vista ecológico y paisajístico: el pinsapo (Figura 6). Este abeto constituye una auténtica reliquia de los antiguos bosques de coníferas que cubrían amplias superficies del continente europeo durante la era Terciaria, habiendo llegado a nuestros días como un verdadero superviviente de los vaivenes climáticos constantes, incendios recurrentes y acción antrópica incesante que lo han convertido en un endemismo estricto de la Serranía de Ronda (Valladares, 2009).

Figura 6. Vista parcial del pinsapar de la Cañada de Enmedio (Sierra de las Nieves).



Fuente: autoría propia.

Actualmente, las principales masas naturales de pinsapo se encuentran repartidas en tres áreas montañosas disjuntas del sur de la península ibérica (Linares & Carreira, 2006; Gutiérrez-Hernández et al., 2017):

- Los Reales de Sierra Bermeja: ocupa una reducida extensión entre los 1300 y 1450 m s.n.m. en los términos municipales de Estepona, Casares, Genalguacil y Jubrique, declarado Paraje Natural en la REMPA.
- Sierra de Grazalema: con una extensión próxima a las 500 ha, este pinsapar se extiende casi en su totalidad por la Sierra del Pinar, encontrándose también, aunque de una forma más dispersa, en Monte Prieto, Cerro Montón y Zafalgar, en altitudes comprendidas entre los 1000 y 1650 m s.n.m. Actualmente se encuentra protegido bajo la figura de Parque Natural.
- Sierra de las Nieves: entre los términos municipales de Ronda, Tolox, Yunquera, Parauta, Monda, Istán y El Burgo se extienden los pinsapares de mayor entidad dentro de la península ibérica, ocupando una superficie de 2000 ha, con ejemplares que llegan a superar los 500 años de edad, en altitudes comprendidas entre los 1000 y 1900 m s.n.m. En 2021 fue declarado Parque Nacional.

Respecto a su actual área de distribución, existen diferencias notables en función de la fuente consultada. Por ejemplo, los estudios realizados por Ruiz de la Torre (1990) en el Mapa Forestal de España asignaban al pinsapar una extensión de 5709 ha. Por su parte, Navarro-Cerrillo et. al. (2006), a partir de la interpretación de fotografía aérea, apoyada por trabajo de campo, estimaron una superficie del pinsapar de 3956 ha. Según el SIOSE (2013), la extensión ocupada por el pinsapo es de 1808 ha, si bien la misma incluye masas mixtas que albergan otros taxones arbóreos, como *Quercus* y *Pinus*. Esta cifra se reduce cuando se trata de masas en las que el pinsapo es la especie dominante (1315 ha), mientras que los reductos monoespecíficos se extienden a lo largo de 938 ha (Gutiérrez-Hernández et al., 2017).

El pinsapo es una especie altamente sensible que posee unos requerimientos ambientales muy específicos para su correcto desarrollo (Arista, 1993; Linares et al., 2010). Al igual que otros abetos, su alta exigencia pluviométrica le ha llevado a localizarse estratégicamente en laderas orientadas al norte, este y noreste en busca de condiciones de humedad y sombra. Ello le ha permitido adaptarse al ambiente seco y cálido imperante durante la estación estival del clima mediterráneo, obligándole a colonizar territorios montanos tan diversos como márgenes de arroyos, fondos de derrubios o canchales calizos (Gutiérrez-Hernández et al., 2017). Sin embargo, y a pesar de dominar amplios rangos altitudinales, esta conífera evita las zonas más expuestas a los vientos, coincidiendo con las cotas más altas, dejando paso a formaciones vegetales de tipo arbustivo y almohadillado como sabinares y piornales. A menores altitudes convive con encinas, alcornoques y quejigos, ocupando los dominios potenciales de especies como el tejo (*Taxus baccata*), acebo (*Ilex aquifolium*), arces (*Acer monspessulanum* y *Acer granatense*), roble andaluz (*Quercus canariensis*), quejigo (*Quercus faginea*), mostajo (*Sorbus aria*), encina (*Quercus ilex*), majuelo (*Crataegus monogyma*), enebro de la miera (*Juniperus*

oxycedrus), sabina mora (*Juniperus phoenicea*) y pino resinero (*Pinus pinaster*). En cotas bajas del Parque Natural de la Sierra de Grazalema aparece de forma conjunta con algarrobos (*Ceratonia siliqua*), alcornoques (*Quercus suber*), almeces (*Celtis australis*), laureles (*Laurus nobilis*), madroños (*Arbutus unedo*) y acebuches (*Olea europaea* var. *sylvestris*); mientras que en la Sierra de las Nieves conforma densas masas boscosas con pinos carrascos (*Pinus halepensis*) (López-Quintanilla, 2013).

En los enclaves peridotíticos más frescos y abrigados de Sierra Bermeja aparece junto a un sotobosque de brezo y, cuando éste es sustituido, los matorrales de *Ulex baeticus*, *Bupleurum spinosum*, *Erinacea anthyllis*, *Lonicera splendida* y *Genista lanuginosa*, entre otras especies, componen el paisaje vegetal (Gómez-Zotano et al., 2014).

Atendiendo a la litología sobre la cual se desarrollan los pinsapares, en calizas su límite superior viene marcado por la aparición de taxones como *Juniperus sabina* y *Quercus faginea*, mientras que especies como *Juniperus phoenicea*, *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis* conforman el paisaje vegetal en su límite inferior, conviviendo igualmente con quejigares y encinares, así como con alcornoques en el Parque Natural de la Grazalema (Valladares, 2009). Respecto a las peridotitas, en las cotas más bajas –donde el pinsapo no encuentra las condiciones mesológicas óptimas para su desarrollo–, el dosel arbóreo aparece representado por quejigos y alcornoques, llegando a conformar masas importantes masas mixtas junto a *P. pinaster* y, en menor medida, *P. halepensis*. Por el contrario, en niveles altitudinales más elevados deja paso a acerales, serbales, sabinares y enebrales, especies que conforman el límite superior de *A. pinsapo* sobre sustratos ultramáficos (Valladares, 2009; López-Quintanilla, 2013).

Aparte de su constatado valor botánico, este abeto goza de otros atributos igualmente sobresalientes. Así, el pinsapo destaca por su papel protector frente a la erosión, protegiendo y estabilizando el suelo sobre el que se desarrolla (Valladares, 2009; López-Quintanilla, 2013). Al mismo tiempo, su característica silueta piramidal y su esbelto porte, llegando incluso a alcanzar los 30 m de altura, le atribuyen una serie de valores estéticos que le hacen ser un abeto muy apreciado y extendido en jardinería dentro del continente europeo.

En definitiva, se trata de una especie única, la cual atesora multitud de valores (ecológicos, paisajísticos, históricos y socio-económicos) sin parangón dentro de las coníferas del sur de España.

7. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

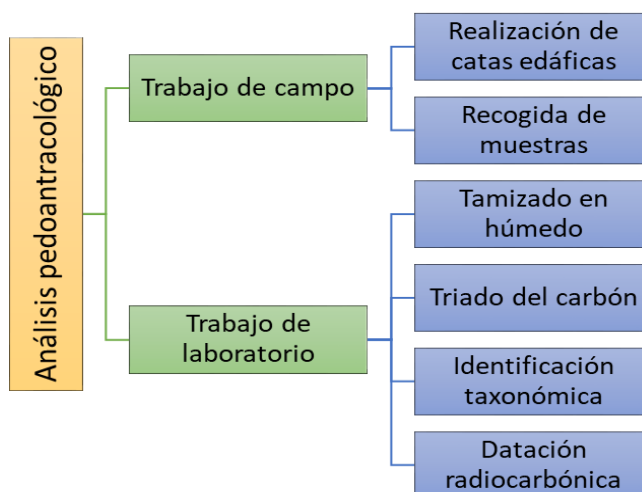
Para llevar a cabo la reconstrucción paleobiogeográfica de *Abies pinsapo* en la Serranía de Ronda, la presente investigación se ha apoyado en el análisis pedoantracológico como metodología de trabajo principal. Asimismo, esta aproximación paleoecológica ha sido complementada con el análisis de diversas fuentes de información afines, como los testimonios históricos, los modelos de distribución de especies (MDE) y los análisis polínicos, las cuales han sido agrupadas bajo el nombre genérico de “Otras fuentes de información”.

7.1. Análisis pedoantracológico

Se ha seguido el protocolo descrito por Thion (1992) y Talon et al. (1998), adaptado posteriormente por Cunill (2010).

Este procedimiento ha constado de dos etapas de trabajo fundamentales (campo y laboratorio) (Figura 7), siendo el protocolo de actuación el siguiente:

Figura 7. Esquema sintético de las fases del análisis pedoantracológico.



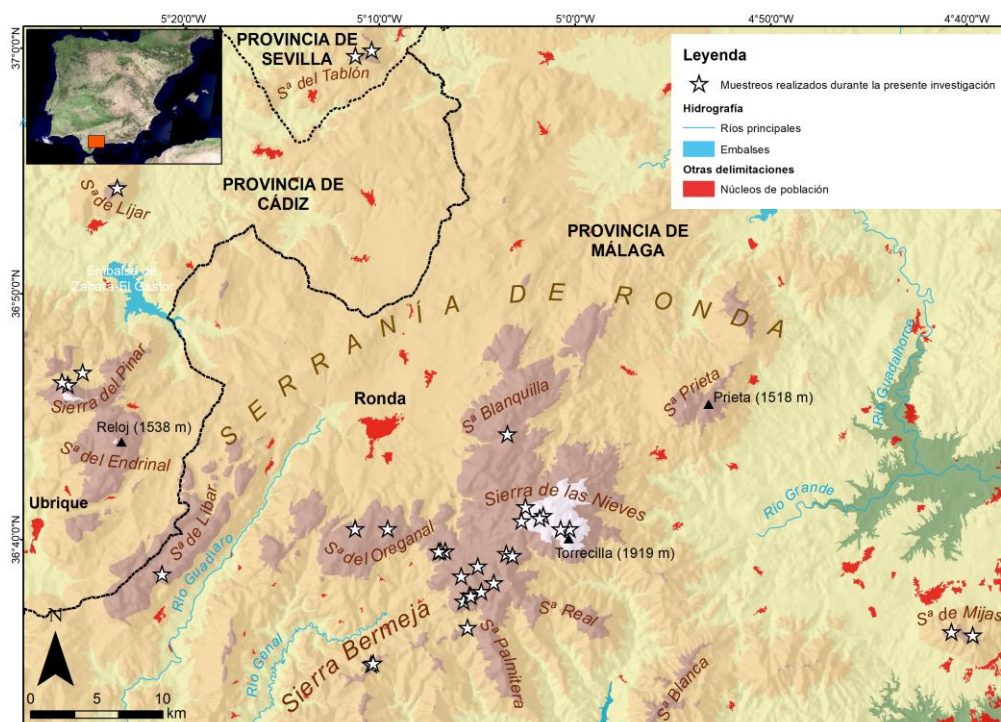
Fuente: autoría propia.

a) Trabajo de campo

- Determinación de los enclaves a muestrear: identificación de los puntos de interés antracológico en función de las características del medio y los intereses de la investigación. Se ha planteado la realización de 35 puntos de muestro antracológico. De este total, 7 corresponden a parcelas control, localizándose en varios de los principales pinsapares preexistentes (Figura 8). Seguidamente, se ha llevado a cabo el establecimiento de una serie de itinerarios de campo. Los muestreos pedoantracológicos se han concentrado en aquellos espacios montañosos que pudieron ejercer de corredor durante el transcurrir migratorio de *A. pinsapo*, dada la posibilidad de que actuaran de nexos de unión de las poblaciones de esta especie, actualmente disyuntas.

- Caracterización geocológica del ámbito de estudio: una vez determinados los puntos de muestreo, y previo a la excavación de los mismos, se han recopilado diferentes datos de carácter geográfico, biogeográfico y ecológico para cada una de las localidades analizadas.

Figura 8. Catas pedológicas realizadas en la Serranía de Ronda durante la presente investigación.



Fuente: autoría propia a partir de las capas de información del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.

- Excavación y recogida de muestras de suelo en campo (Figura 9): tras las tareas anteriormente descritas, se ha procedido a la excavación, extracción y recogida de muestras de suelo de los distintos niveles de muestreo reconocidos en los perfiles edáficos identificados. Seguidamente, se han recogido de 5 a 10 kilogramos de tierra (ocasionalmente más) por cada nivel de muestreo, que aproximadamente correspondieron a un espesor de 10 a 20 cm del perfil general del suelo. En total, se han realizado 35 catas pedológicas repartidas por buena parte del conjunto fisiográfico de la Serranía de Ronda.
- Recogida de muestras de madera. También se han recopilado muestras de madera de las especies leñosas que actualmente caracterizan el paisaje vegetal en de cada uno de los puntos de muestreos analizados. Su carbonización ha servido para completar la colección antracológica de referencia del Laboratorio de Geografía de la Universidad de Granada, lo que ha ayudado a la identificación de las muestras de carbón encontradas en el suelo.

Figura 9. Excavación manual para la realización de uno de los muestreos llevados a cabo durante la presente investigación.



Fuente: José Gómez Zotano.

b) Trabajo de laboratorio

- Tamizado (Figura 10). Las muestras edáficas colectadas en campo, una vez secas al aire libre, han sido tamizadas. Aunque ha sido posible el tamizado en seco, en este caso se ha optado por el tamizado con agua mediante tamices de 0.8, 2 y 5 mm de paso de malla para obtener todo el registro antracológico.

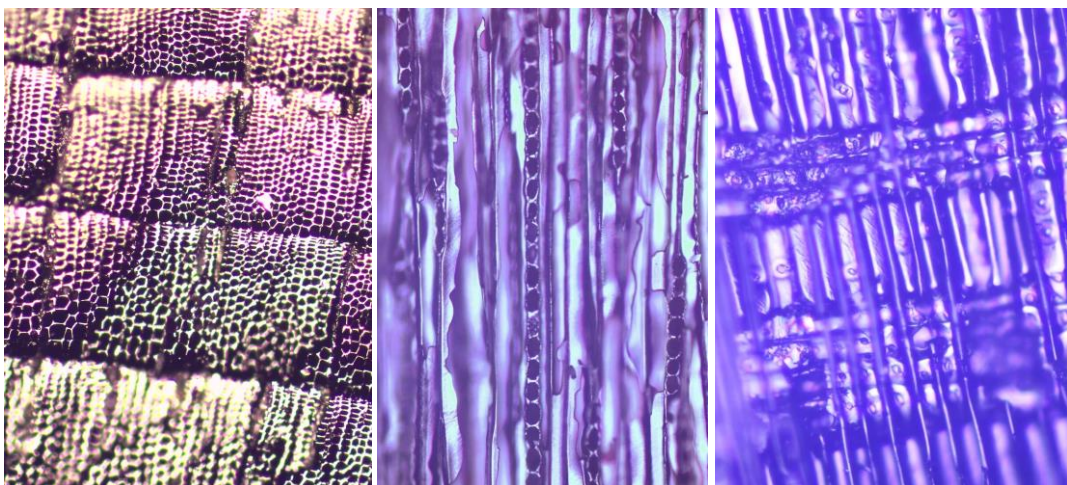
Figura 10. Tamizado en húmedo de las muestras edáficas recogidas en campo.



Fuente: José Antonio Olmedo Cobo.

- Triado. Durante esta fase se ha procedido, mediante el empleo de una lupa binocular, a la selección manual del carbón con objeto de aislarlo del sedimento residual de cada tamiz.
- Cálculo de antracomasa. Este valor se ha obtenido dividiendo el peso en miligramos del carbón recuperado en cada nivel de muestreo con la masa en kilogramos de la muestra –incluyendo todos los niveles–, una vez se le resta a esta el peso del material mineral cuyo tamaño es superior a 5 mm.
- Identificación taxonómica. Una vez seleccionados, los carbones recuperados del suelo han sido preparados convenientemente para su identificación. Mediante pinzas y bisturí se han realizado diferentes cortes con el objetivo de visualizar los tres planos anatómicos de la madera (plano transversal, plano longitudinal tangencial y plano longitudinal radial) (Figura 11), lo cual ha permitido identificar características anatómicas clave. Para ello se ha empleado un microscopio óptico de luz reflejada Olympus BX51, con un rango de aumentos que oscila entre 50x y 500x. Esta identificación se ha apoyado en diferentes atlas de anatomía comparada de madera y carbón (Jaquiot et al. 1973; Schweingruber, 1990; Vernet et al., 2001), así como en la colección de referencia de especies mediterráneas actuales, resultado de la carbonización en laboratorio de las muestras recogidas en campo. Por norma general, el número de fragmentos identificados en cada nivel de muestreo ha sido de un máximo de 50. No obstante, en algunas localizaciones, especialmente de aquellas donde la presencia de carbón ha sido muy destacada, se han identificado hasta 100 carbones por nivel de muestreo. El número total de carbones identificados taxonómicamente ha sido de 4126.

Figura 11. Planos anatómicos del género *Abies*. Izquierda: plano transversal, en el cual destaca la ausencia de canales de resina. Centro: plano longitudinal tangencial, donde sobresale un radio con una altura superior a 15 células, una característica anatómica muy singular en este género. Derecha: plano longitudinal radial, en el que se aprecian radios homocelulares y ausencia de traqueidas radiales



Fuente: autoría propia.

- Datación radiocarbónica. Durante el transcurso de la investigación se han datado 77 fragmentos de carbón. El procedimiento, fundamentado en la datación radiométrica C¹⁴ mediante espectrometría de masas con acelerador, ha sido empleado para conocer la antigüedad de las diferentes muestras seleccionadas. Los laboratorios seleccionados para la realización de este cometido han sido dos: Poznan Radiocarbon Laboratory (Poznan, Polonia) y Alfred-Wegener-Institut (Bremerhaven, Alemania). Los criterios elegidos para determinar qué fragmentos debían ser sometidos a datación radiocarbónica ha respondido a razones fundamentalmente ecológicas. En este sentido, y puesto que el objetivo fundamental de la investigación ha radicado en reconstruir el área de distribución del pinsapo durante los últimos milenios, las muestras atribuidas al género *Abies* han sido las que han centrado gran parte de la atención. Ello se ha traducido en la datación de un total de 35 fragmentos de *Abies* sp. No obstante, abordar un estudio paleoecológico como el presente supone considerar otros taxones que pudiesen ser de interés a la hora de intentar comprender las dinámicas holocenas experimentadas por la vegetación arbórea. Es por ello que también se han datado 16 muestras de *Pinus*, 9 de *Pinus* tipo *nigra/sylvestris*, 6 de *Quercus* caduco, 4 de *Pinus pinaster*, 3 de *Acer*, 3 de *Quercus* y 1 de *Fraxinus*. Finalmente, las muestras han sido calibradas con el software Oxcal v.4.4 y la base de datos IntCal20 (Reimer et al., 2020), 2 sigma (95 % probabilidad).
- Tratamiento estadístico de los carbones y de las antracomasas resultantes. Esta tarea se apoyó en el empleo de Office, especialmente de Microsoft Excel como hoja de cálculo.

7.2. Otras fuentes de información

El análisis pedoantracológico, si bien ha constituido el cuerpo metodológico principal, ha sido complementado con el análisis de otras fuentes de información. Este procedimiento se ha articulado en las siguientes fases de trabajo:

Fase 1. Búsqueda y selección de los trabajos de mayor impacto de cada una de las fuentes de información descritas (testimonios históricos, MDE y análisis polínicos).

Fase 2. Análisis, síntesis y redacción de las principales aportaciones de cada una de las diferentes fuentes de información.

Fase 3. Comparación de las conclusiones derivadas de las diferentes fuentes de información analizadas, con aquellas derivadas el análisis pedoantracológico.

BLOQUE III

RESULTADOS



8. LA PEDOANTRACOLOGÍA EN ESPAÑA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Resumen

La pedoantracología se define como la búsqueda, tratamiento y análisis taxonómico de carbón procedente de vegetación leñosa incendiada en suelos no arqueológicos. Sus aplicaciones han permitido cubrir un amplio espectro de temáticas, sobre todo cuando ha formado parte de aproximaciones paleoecológicas multidisciplinares. En líneas generales, esta metodología ha manifestado un interés creciente dentro de las disciplinas paleoecológicas, aunque actualmente existen enormes diferencias territoriales, de manera que Francia –territorio pionero en la aplicación de esta metodología– produce buena parte de las publicaciones pedoantracológicas europeas. En España, su aplicación en Pirineos, Sistema Central, Cordillera Bética y Cordillera Cantábrica ha sido relativamente reciente, no conociéndose en consecuencia ni su trayectoria ni su estado actual. Por ello, en este trabajo se presenta un análisis detallado y comparativo de todas aquellas investigaciones de carácter pedoantracológico llevadas a cabo en este último país, lo que ha permitido conocer cuáles han sido las conclusiones más relevantes obtenidas por los diferentes grupos de trabajo. Este análisis ha puesto de manifiesto que se trata de una metodología que ha obtenido resultados de gran interés a la hora de resolver debates fitosociológicos clásicos, reconstruir antiguas áreas de distribución de especies o determinar cambios en el límite superior del bosque, resultados que han contribuido y pueden seguir contribuyendo al desarrollo de una gestión forestal sostenible más eficaz. Por su parte, el futuro de la disciplina muestra un progresivo avance hacia otros sistemas montañosos, constatando que se trata de una metodología que ha sabido ganarse su lugar dentro de las disciplinas paleoecológicas.

Palabras clave: carbones; suelos naturales; revisión bibliográfica; paleoecología; España.

Abstract

Pedoanthracology is defined as the search, treatment and taxonomic analysis of charcoal from burned woody vegetation in non-archaeological soils. Its applications have allowed studying a wide spectrum of topics, especially when it has been part of multidisciplinary paleoecological approaches. In general terms, this methodology has shown growing interest within paleoecological disciplines, although there are currently enormous territorial differences, such that France –a pioneer territory in the application of this methodology– is the country where a large part of pedoanthracological publications in Europe are written. In others, such as Spain, its application in Pyrenees, Central System, Baetic System and Cantabrian Range has been relatively recent, neither its trajectory nor its current status being known. For this reason, this work presents a detailed and comparative analysis of all those investigations of a pedoanthracological nature carried out, which has allowed us to know what the most relevant conclusions obtained by the different working groups have been. This analysis has shown that it is a methodology that has obtained results of great interest when solving classical

phytosociological debates, reconstructing old species distribution areas or determining changes in the treeline, results that can contribute and can continue contributing to development of more effective sustainable forest management. Also, the future of the discipline shows a progressive advance towards other mountain systems, confirming that it is a methodology that has managed to earn its place within paleoecological disciplines.

Keywords: charcoals; natural soils; bibliographic review; paleoecology; Spain.

8.1. Introducción

La caracterización y dinámica paleobiogeográfica de la vegetación actual constituye un pilar fundamental a la hora de comprender los principios explicativos que ayudan a interpretar las relaciones entre especies y ambientes. En la naturaleza, muchos patrones no pueden ser entendidos si no se analizan bajo una escala temporal amplia –de cientos a miles de años– (Willis & Birks, 2006). Es por ello por lo que los estudios de corte paleoecológico ofrecen una magnífica oportunidad para predecir los posibles comportamientos de la vegetación ante escenarios dinámicos de Cambio Global, constituyendo una herramienta de vital importancia a la hora de orientar las estrategias de gestión y conservación sostenible en espacios naturales (Willis et al., 2007; Saulnier-Talbot, 2016).

Las posibilidades a la hora de reconstruir ambientes y condiciones ecológicas pretéritas son múltiples, disponiendo de un extenso catálogo de bioindicadores y señales paleoambientales que, bajo unas condiciones específicas de conservación, son estudiadas por diferentes disciplinas paleoecológicas. Algunas de ellas, como la palinología, poseen una larga tradición científica en buena parte de los países desarrollados, que en el caso de España se inicia con los trabajos de Bellot & Vieitez (1945). En otros casos su desarrollo es mucho más reducido, tal y como sucede con la pedoantracología, disciplina que se encarga del estudio de carbón procedente de vegetación leñosa en suelos no arqueológicos para su cuantificación –o cálculo de antracomasa– y su identificación taxonómica (Thinon, 1992), con el objeto de estudiar la composición de comunidades de plantas leñosas del pasado a una escala muy detallada, procedimientos que normalmente van acompañados de dataciones radiocarbónicas (Nelle et al., 2013).

Este carbón es una de las consecuencias directas de los recurrentes incendios –ya sean naturales o de origen antrópico– que se han sucedido a lo largo del Holoceno. Su estudio se convierte en un excepcional recurso complementario para cualquier aproximación paleoecológica y paleobiogeográfica a un ámbito espacial concreto, siendo de gran utilidad como fuente para el conocimiento geográfico de los incendios forestales –análisis de microcarbones– (Turner et al., 2008), así como para reconstruir con gran precisión espacial la dinámica de la vegetación en el pasado (Carcaillet & Talon, 1996; Talon et al., 1998). De hecho, el fuego constituye uno de los principales agentes modeladores del paisaje vegetal a lo largo de la historia, siendo un elemento clave para explicar la gran diversidad de especies asociadas al clima mediterráneo (Bond & Keeley, 2005).

Bajo estas consideraciones, primero la antracología, cuyo objeto de estudio es tanto el carbón resultante de una mala combustión como aquel que ha sido transformado voluntariamente, iniciaría su andadura en el panorama científico a partir de la investigación de Unger (1846). En este apartado se incluyen los restos presentes en suelos geológicos y en yacimientos arqueológicos, con especial atención a estos últimos, donde la acción antrópica en hogares, hornos, carboneras, etc. jugó un papel fundamental en la génesis de estos registros paleoecológicos (Uzquiano, 1997). Posteriormente, la pedoantracología, desarrollada por Thinon (1978), centraría el foco de atención en los carbones procedentes de paleosuelos – fuera de contextos arqueológicos–. A este respecto se considera toda aquella madera carbonizada que se origina como respuesta a incendios de origen natural y antrópico, conservándose como un registro no estratigráfico, lo que obliga a datar necesariamente cada una de las muestras (Thinon, 1992).

En consecuencia, ambas disciplinas posibilitan la reconstrucción de la historia ecológica de especies y/o comunidades. El proceder de una y otra comparte similitudes evidentes en cuanto a la búsqueda, triado e identificación del carbón, si bien es en el tamaño de éste donde ambas metodologías encuentran sus mayores desemejanzas. La práctica totalidad de ensayos pedoantracológicos trabaja fracciones de madera carbonizada con dimensiones que generalmente suelen oscilar entre 5 y 1 mm –pasos de malla de 5, 2 y 0.8 mm (Nelle et al., 2013), mientras que el método antracológico, salvo que haya resultados significativos, deshecha los fragmentos más finos (Rodríguez-Ariza, 2006).

Tanto la aplicabilidad como el interés de la pedoantracología han ido incrementándose durante las últimas décadas, si bien la extensa bibliografía pedoantracológica se concentra mayoritariamente en Europa y, en particular, en Francia. En otros países como Italia, Alemania o República Checa esta disciplina también ha sido desarrollada durante los últimos años (Nelle et al., 2013).

En el caso de España, la aplicación del método pedoantracológico es relativamente reciente, iniciándose los trabajos en la cara sur del macizo pirenaico a partir de la tesis doctoral de Cunill (2010). Posteriormente esta metodología paleoecológica se expandiría hacia otros sistemas montañosos de España, como la Cordillera Prelitoral catalana, el Sistema Central, la Cordillera Bética y la Cordillera Cantábrica.

En este contexto metodológico y de conocimiento, este trabajo pretende hacer una revisión bibliográfica de los diferentes ensayos pedoantracológicos realizados hasta el momento en España, llevando a cabo un análisis detallado y comparativo de todas aquellas cuestiones que pudiesen ser de interés desde el punto de vista pedoantracológico y paleoecológico. Ello posibilita, en primer lugar, conocer cuál ha sido la trayectoria de la disciplina en España y su posición relativa dentro del continente europeo, mostrando información relevante sobre las variables estudiadas, líneas de investigación seguidas, principales resultados obtenidos y conclusiones derivadas de los diferentes ensayos realizados. Por otra parte, este análisis permite conocer las principales aplicaciones que ha tenido hasta el momento la

pedoantracología como disciplina paleoecológica, y cómo sus resultados pueden sentar las bases de determinadas políticas de gestión forestal en diferentes espacios naturales de España.

8.2. Métodos

8.2.1. Búsqueda en base de datos

En primer lugar, se llevó a cabo una búsqueda sistematizada de todas aquellas investigaciones que integrasen –entre alguna de sus palabras clave o bien dentro del tema, el resumen o el título– conceptos como antracología y/o pedoantracología, lo cual se hizo tanto en castellano como en inglés (anthracology y pedoanthracology). El propósito de incluir en esta búsqueda preliminar el término “antracología” fue el de poder obtener información que pudiese ser de interés para la investigación, como así fue, por ejemplo, a la hora de contextualizar los antecedentes de este ensayo. Para esta búsqueda se emplearon las principales bases de datos académicas, como Web of Science, Scopus, BASE, Dialnet, Springer Link, Researchgate o Google Scholar, entre otras.

Una vez completada esta primera búsqueda en bruto, el siguiente paso fue filtrar los resultados según localización, es decir, atendiendo al ámbito de estudio y/o de aplicación de la investigación. Esta depuración permitió que se excluyeran aquellos trabajos referentes a ámbitos fuera de España, de manera acorde a los objetivos de la investigación. En total, se obtuvieron en un primer momento 212 documentos en Web of Sciences, 207 en Scopus o 96 en BASE, por ejemplo, que finalmente quedaron en algunas decenas o unidades (según la base de datos consultada) tras aplicar los filtros anteriormente mencionados.

Seguidamente se procedió a la lectura individualizada de los resúmenes y metodología de cada uno de los documentos obtenidos: un total de 34 (tanto en castellano como en inglés). Con ello se excluyó aquella bibliografía que, o bien trabajaba con carbón desde un punto de vista complementario o parcial (caso de los microcarbones), o lo hacía desde una perspectiva arqueológica, es decir, bajo el prisma de la antracología.

En este punto también se excluyeron aquellos documentos referentes a comunicaciones y pósteres presentados en congresos, ya que éstos son resultados previos de ensayos pedoantracológicos publicados posteriormente en forma de artículo científico.

Seleccionados los documentos estrictamente pedoantracológicos, se procedió a su análisis interpretativo y categorizado atendiendo a criterios como la fecha de publicación, la autoría, el ámbito de estudio, los objetivos, las líneas de aplicabilidad, el idioma y otra serie de datos de carácter pedoantracológico y paleoecológico que pudiesen arrojar información de interés para la presente investigación.

Por último, cabe mencionar que, aunque buena parte de la bibliografía se encontraba disponible en formato digital, en algunos casos –capítulos de libro, principalmente– hubo que

recurrir al formato impreso para poder realizar la revisión de todos aquellos datos relevantes para la investigación.

8.2.2. Entrevistas informales

Tras la revisión bibliográfica inicial, se contactó con algunos de los autores de los diferentes estudios pedoantracológicos recopilados. Esto permitió corroborar los resultados de la primera fase, al tiempo que posibilitó conocer las posibles líneas futuras de trabajo en materia de pedoantracología. Las entrevistas en cuestión no tenían una estructura previamente determinada ni categorizada, apostándose por un carácter informal de las mismas con el fin de facilitar el intercambio directo de información entre ambas partes (Vargas-Jiménez, 2012).

Después de abordar tanto la revisión bibliográfica como las entrevistas informales, el resultado final ha sido la consideración de un total de 22 trabajos en los que, de forma explícita o interdisciplinar, la pedoantracología constituye una de las metodologías de trabajo utilizadas para la consecución de los objetivos propuestos.

8.3. Resultados

Los resultados, sintetizados en la tabla 2, ofrecen la siguiente información:

8.3.1. Autoría

Se ha contabilizado un total de 24 autores y coautores –22 españoles y 2 franceses–, con una participación porcentual que difiere enormemente según casos. De esta manera, Cunill, del Departamento de Geografía de la Universidad Autónoma de Barcelona (UAB en adelante) y miembro del Grup de Recerca de Àrees de Muntanya i Paisatge (GRAMP en adelante), es el apellido más repetido en los trabajos de pedoantracología a nivel español, participando –bien como autora o coautora– en más del 86 % de las publicaciones.

Tabla 2. Síntesis informativa por áreas de estudio derivada de la bibliografía consultada.

PIRINEOS
1. Cunill, R. (2010). <i>Estudi interdisciplinari de l'evolució del límit superior del bosc durant el període holocènic a la zona de Plaus de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català</i> (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Barcelona.
2. Cunill-Artigas, R., Pèlachs, A. & Soriano, J.M. (2008). The consequences on landscape of new land uses in the upper forest line. En Prados, M.J. (Ed.), <i>Naturbanization: New identities and processes for rural-natural areas</i> . CRC Press/Balkema, Leiden.
3. Cunill-Artigas, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A. & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. <i>Vegetation History and Archaeobotany</i> , 21(4), 373–384. https://doi.org/10.1007/s00334-011-0342-y
4. Cunill-Artigas, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A., Rodríguez, J.M. & Pérez-Obiol, R. (2013). Holocene high-altitude vegetation dynamics in the Pyrenees: a pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach. <i>Quaternary International</i> , 289, 60–70. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.04.041
5. Pèlachs, A., Pérez-Obiol, R., Soriano, J.M., Cunill, R., Bal, M.C. et al. (2017). The Role of Environmental Geohistory in High-Mountain Landscape Conservation. En Catalan, J., Ninot, J. & Aniz, M.

(Eds.), <i>High Mountain Conservation in a Changing World. Advances in Global Change Research</i> (pp. 107–129). Springer.	
6. Soriano, J.M., Pèlachs-Mañosa, A., Pérez-Obiol, R., Rodríguez, J.M. & Cunill-Artigas, R. (2016). Dinámica del abeto en el Pirineo catalán durante los últimos 10.000 años. En Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), <i>Avances en Biogeografía: áreas de distribución: entre puentes y barreras</i> (pp. 544–552). Editorial Universidad de Granada-Tundra Ediciones.	
Año de publicación	2008 (2), 2010 (1), 2012 (3), 2013 (4), 2016 (6) y 2017 (5).
Tipo de documento	Tesis doctoral (1), capítulos de libro (2, 5 y 6) y artículos científicos (3 y 4).
Importancia de la pedoantracología	Alto: la pedoantracología constituye una de las metodologías de trabajo principales para la consecución de los objetivos propuestos (1, 2, 3 y 4). Medio: la pedoantracología actúa como fuente paleoecológica complementaria (5 y 6).
Muestras pedológicas	8 muestras sobre litologías metamórficas (entre 1996 y 2593 m s. n. m.) (1, 3, 4 y 5). 1 muestra sobre litologías metamórficas (1150) (6). No se especifica (2).
Objetivo/s principal/es	Estudiar la evolución del límite superior del bosque (1, 2, 3 y 4), contribuir con información y reflexión sobre líneas de base de diversidad, umbrales, resiliencia y restauración de procesos ecológicos (5) y conocer con precisión la distribución de los abetales en el pasado (6).
Taxones identificados	Especies: <i>Abies alba</i> , <i>Genista balansae</i> , <i>Pinus sylvestris/uncinata</i> . Géneros: <i>Betula</i> . Familias: ericácea.
Valores de antracosa	Entre 0.2 y 1730 mg/kg.
Dataciones radiocarbónicas	13 dataciones con cronologías comprendidas entre 679 y 10 796 años antes del presente (años cal BP en adelante) (1, 3, 4 y 5). No se realizan (2 y 6).
Tipo de aproximación	Ecológica (1, 3, 4 y 5), geográfica (6) y no se especifica (2).
PIRINEOS Y CORDILLERA CANTÁBRICA	
1. Carracedo-Martín, V., Cunill-Artigas, R., García-Codrón, J.C., Pèlachs-Mañosa, A., Pérez-Obiol, R. et al. (2017). Fuentes para la geografía histórica de los incendios forestales. Algunas consideraciones metodológicas. <i>Cuadernos Geográficos</i> , 56(3), 66–89.	
2. García-Codrón, J.C., Pèlachs-Mañosa, A. & Carracedo-Martín, V. (2016). Fuentes para la historia de los incendios forestales y su impacto en la vegetación: puentes y barreras metodológicas. En Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), <i>Avances en Biogeografía: áreas de distribución: entre puentes y barreras</i> (pp. 563–571). Editorial Universidad de Granada-Tundra Ediciones.	
3. Pèlachs, A., García-Codrón, J.C., Soriano, J.M., Pérez-Obiol, R. & Catalán, J. (2016). Papel de los incendios en las dinámicas forestales del norte de la Península Ibérica durante el Holoceno. En Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), <i>Avances en Biogeografía: áreas de distribución: entre puentes y barreras</i> (pp. 553–562). Editorial Universidad de Granada-Tundra Ediciones.	
Año de publicación	2016 (2 y 3) y 2017 (1).
Tipo de documento	Artículo científico (1) y capítulo de libro (2 y 3).
Importancia de la	Media: la pedoantracología actúa como fuente paleoecológica

pedoantracología	complementaria (1, 2 y 3).
Muestréos pedológicos	No se especifican.
Objetivo/s principal/es	Conocer la geohistoria de los incendios y de la cubierta vegetal (1, 2 y 3).
Taxones identificados	No se especifican.
Valores de antracomasa	No se especifican.
Dataciones radiocarbónicas	No se realizan.
Tipo de aproximación	No se especifica.
CORDILLERA CANTÁBRICA	
<p>1. Beato-Bergua, S. (2018). <i>El patrimonio natural de la Sierra del Aramo (Montaña Central Asturiana) y la evolución de su paisaje</i> (Tesis Doctoral). Universidad de Oviedo.</p> <p>2. Beato-Bergua, S. (2019). El patrimonio natural de la Sierra del Aramo (Montaña Central Asturiana) y la evolución de su paisaje (Summary of Doctoral dissertation, Universidad de Oviedo, Spain). <i>Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles</i>, 80, 1–5.</p> <p>3. Beato-Bergua, S., Poblete-Piedrabuena, M.A. & Cunill-Artigas, R. (2019). <i>Taxus baccata</i> en la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano). <i>Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles</i>, 81, 1–30. https://doi.org/10.21138/bage.2772</p>	
Año de publicación	2018 (1) y 2019 (2 y 3).
Tipo de documento	Tesis doctoral (1) y artículos científicos (2 y 3).
Importancia de la pedoantracología	Media: la pedoantracología actúa como fuente paleoecológica complementaria.
Muestréos pedológicos	2 muestréos sobre litologías sedimentarias (entre 1611 y 1701 m s. n. m.).
Objetivo/s principal/es	Aumentar el conocimiento biogeográfico sobre el tejo.
Taxones identificados	Géneros: <i>Betula</i> , <i>Corylus</i> , <i>Fagus</i> , <i>Ilex</i> , <i>Juniperus</i> , <i>Quercus</i> , <i>Taxus</i> . Familias: ericácea.
Valores de antracomasa	Entre 23.75 y 28.77 mg/kg.
Dataciones radiocarbónicas	7 dataciones radiocarbónicas con cronologías comprendidas entre edades subactuales y 3450 años cal BP.
Tipo de aproximación	Geográfica.
CORDILLERA PRELITORAL CATALANA	
<p>1. Cunill-Artigas, R., Pèlachs-Mañosa, A., Soriano, J.M., Pérez-Obiol, R., Nadal, J. (2018). Evolución paleobiogeográfica del abeto (<i>Abies alba</i>) en su límite meridional ibérico (Parc natural del Montseny, Girona-Barcelona). En Gosálbez, R.U., Díaz, M.C., García, J.L., Serrano de la Cruz, M.A. & Jerez, O. (Eds.), <i>Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación. Aportaciones desde la Biogeografía</i> (pp. 860–868). Ediciones de Castilla-La Mancha.</p>	
Año de publicación	2018.
Tipo de documento	Capítulo de libro.
Importancia de la pedoantracología	Alta: la pedoantracología constituye una de las metodologías de trabajo principales para la consecución de los objetivos propuestos.
Muestréos pedológicos	3 muestréos sobre litologías metamórficos (entre 1357 y 1605 m s. n. m.).
Objetivo/s principal/es	Conocer la evolución paleobiogeográfica del abeto.

Taxones identificados	Géneros: <i>Abies</i> , <i>Betula</i> , <i>Calluna</i> , <i>Corylus</i> , <i>Daphne</i> , <i>Erica</i> , <i>Fagus</i> , <i>Juniperus</i> , <i>Pinus</i> , <i>Prunus</i> , <i>Quercus</i> . Familias: ericácea, fabácea, rosácea.
Valores de antracomasa	No se especifican.
Dataciones radiocarbónicas	6 dataciones con cronologías comprendidas entre edades subactuales y 4095 años cal BP.
Tipo de aproximación	Geográfica.
SISTEMA CENTRAL	
1. García-Álvarez, S., Bal, M.C., Allée, P., García-Amorena, I. & Rubiales, J.M. (2017). Holocene treeline history of a high- mountain landscape inferred from soil charcoal: the case of Sierra de Gredos (Iberian Central System, SW Europe). <i>Quaternary International</i> , 457(1), 85–98. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.04.019	
Año de publicación	2017.
Tipo de documento	Artículo científico.
Importancia de la pedoantracología	Alta: la pedoantracología constituye una de las metodologías de trabajo principales para la consecución de los objetivos propuestos.
Muestras pedológicas	6 muestreos sobre materiales metamórficos e ígneos (entre 1700 y 2200 m s. n. m.).
Objetivo/s principal/es	Reconstruir el límite altitudinal del bosque.
Taxones identificados	Géneros: <i>Betula</i> , <i>Pinus</i> , <i>Populus</i> , <i>Quercus</i> . Familias: ericácea, leguminosa, rosácea, salicácea.
Valores de antracomasa	Entre 1373 y 46 868 mg/kg.
Dataciones radiocarbónicas	23 dataciones radiocarbónicas con cronologías comprendidas entre 1102 y 8914 años cal BP.
Tipo de aproximación	Ecológica.
CORDILLERA BÉTICA	
1. Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Martínez-Ibarra, E. & Cunill-Artigas, R. (2015). Descubrimiento y caracterización de una cuenca endorreica en la cumbre de Sierra Bermeja (provincia de Málaga). En De la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R. & Rodrigues, M. (Eds.), <i>Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación</i> (pp. 1629–1638). Universidad de Zaragoza-AGE.	
2. Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Martínez-Ibarra, E. (2017). Descubrimiento y caracterización geográfica de una depresión ultramáfica en Sierra Bermeja: nuevos datos geomorfoedáficos, fitogeográficos y paleoecológicos. <i>Pirineos</i> , 172. http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172001	
3. Gómez-Zotano, J., Cunill-Artigas, R., Olmedo-Cobo, J.A. & Arias-García, J. (2018). Análisis pedoantracológico y propuesta de conectividad ecológica de <i>Abies pinsapo</i> en la Red Natura 2000 de Sierra Bermeja. En Gosálbez, R.U., Díaz, M.C., García, J.L., Serrano de la Cruz, M.A. & Jerez, O. (Eds.), <i>Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación. Aportaciones desde la Biogeografía</i> (pp. 635–645). Almud, Ediciones de Castilla La Mancha.	
4. Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2016). Nuevos datos paleoecológicos de <i>Abies</i> ssp. en el sur de España a partir del análisis pedoantracológico en Sierra Bermeja. En Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), <i>Avances en Biogeografía: áreas de distribución: entre puentes y barreras</i> (pp. 582–591). Editorial Universidad de Granada-Tundra Ediciones.	
5. Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2017). Paleoecología de <i>Abies</i> sp. en Sierra Bermeja (sur de la península ibérica) durante el Holoceno medio a partir del análisis pedoantracológico. <i>Bosque</i> , 38(2), 259–270. http://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200004	
6. Olmedo-Cobo, J.A., Gómez-Zotano, J., Cunill-Artigas, R. & Serrano-Montes, J.L. (2018). Controversia	

<p>latifolias-coníferas sobre sustratos ultramáficos: una resolución desde las fuentes históricas y la pedoantracología. En Gosálbez, R.U., Díaz, M.C., García, J.L., Serrano de la Cruz, M.A. & Jerez, O. (Eds.), <i>Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación. Aportaciones desde la Biogeografía</i> (pp. 242–253). Almud, Ediciones de Castilla La Mancha.</p> <p>7. Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Gómez-Zotano, J. (2019a). The native status of <i>Pinus pinaster</i> on serpentine soils: charcoal analysis and palaeoenvironmental history in Sierra Bermeja (southern Iberian Peninsula, Spain). <i>Vegetation History and Archaeobotany</i>, 28, 417–432. https://doi.org/10.1007/s00334-018-0701-z</p> <p>8. Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Gómez-Zotano, J. & Pardo-Martínez, R. (2019b). Aportaciones del análisis pedoantracológico al conocimiento paleoecológico de <i>Pinus pinaster</i> en el sur de España: el caso de Sierra Bermeja. <i>Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles</i>, 80, 1–34. https://doi.org/10.21138/bage.2667</p>	
Año de publicación	2015 (1), 2016 (4), 2017 (2 y 5), 2018 (3 y 6) y 2019 (7 y 8).
Tipo de documento	Capítulos de libro (1, 3, 4 y 6) y artículos científicos (2, 5, 7 y 8).
Importancia de la pedoantracología	Alta: la pedoantracología constituye una de las metodologías de trabajo principales para la consecución de los objetivos propuestos.
Muestreos pedológicos	1 muestreo sobre litologías ígneas (1364 m s. n. m.) (1, 2, 4 y 5). 7 muestreos sobre litologías ígneas (entre 638 y 1364 m s. n. m.) (3 y 7). 11 muestreos sobre litologías ígneas (entre 146 y 1364 m s. n. m.) (6 y 8).
Objetivo/s principal/es	Reconstruir la paleobiogeografía del pinsapo en el sur peninsular (1, 2, 3, 4 y 5). Resolver la controversia científica latifolias-coníferas como vegetación climática en sustratos ultramáficos (6, 7 y 8).
Taxones identificados	Especies: <i>Arbutus unedo</i> , <i>Pinus pinaster</i> . Géneros: <i>Abies</i> , <i>Cistus</i> , <i>Quercus</i> .
Valores de antracomasa	Entre 1.4 y 137 379 mg/kg.
Dataciones radiocarbónicas	No se realizan (1 y 2). 10 dataciones con cronologías comprendidas entre edades subactuales y 8180 años cal BP (3, 4, 5, 6 y 7). 19 dataciones con cronologías comprendidas entre edades subactuales y 8180 años cal BP.
Tipo de aproximación	Geográfica.

Fuente: autoría propia.

Otros autores destacados son Olmedo-Cobo y Gómez-Zotano, ambos del Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física de la Universidad de Granada (UGR en adelante), y Pèlach, del Departamento de Geografía de la UAB y miembro del GRAMP; en los tres casos su participación es del 41 %. Soriano, del Departamento de Geografía de la UAB y miembro del GRAMP, aparece en un 36 % de las publicaciones, porcentaje que se reduce hasta el 32 % para Pérez-Obiol, del Departamento de Biología Animal, Biología Vegetal y Ecología (UAB).

El porcentaje se sitúa en un 18 % para Bal, del Geode (Géographie de l'Environnement), en Toulouse-le-Mirail (Francia), coautora de 4 publicaciones. El mismo porcentaje en el caso de

García-Codron, del Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Cantabria y miembro del Grupo de Investigación Estudio y Gestión del Medio Natural (GIMENA en adelante) y Martínez-Ibarra (Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física de la UGR), reduciéndose hasta casi el 14 % para Carracedo (Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Cantabria y miembro del GIMENA).

Menor participación han tenido Nadal, Sánchez-Morales, Arias, Manel, García-Amorena y Beato, todos ellos con una significación en torno al 9 %.

Por último, los autores que aparecen citados una sola vez son Rubiales (Departamento de Sistemas y Recursos Naturales de la Universidad Politécnica de Madrid), Serrano (Departamento de Geografía Humana de la UGR), Pérez-Haase (Departamento de Botánica y Micología de la Universidad de Barcelona), Poblete (Departamento de Geografía de la Universidad de Oviedo), Pardo (Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física de la UGR), Nunes (Departamento de Geografía de la UAB), Allée y García-Álvarez, ambos del Laboratorio de Geografía Física y Ambiental de la Universidad de Limoges.

8.3.2. Fecha de publicación

Los trabajos sobre pedoantracología en España se iniciaron en 2010 a partir de la defensa de la tesis doctoral de Cunill-Artigas: “Estudi interdisciplinari de l’evolució del límit superior del bosc durante el període holocenic a la zona de Plaús de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català. Pedoantracologia, palinologia, carbons sedimentaris i fonts documentals”. No obstante, ya en 2008 la misma autora y colaboradores empezaron a trabajar con esta metodología, analizando las consecuencias en el paisaje de los nuevos usos del suelo en el límite superior del bosque (ver Cunill et al., 2008). A partir de entonces han sido publicados diferentes trabajos en los que esta disciplina tiene un peso sustancial en la investigación, ya sea como metodología principal o formando parte de una aproximación multidisciplinar.

Por fechas, 2017 y 2018 han sido los años más prolíficos en cuanto a publicaciones sobre pedoantracología se refiere, con un total de 9 publicaciones durante este bienio. Ello se debe, en buena medida, a determinados congresos y otros eventos de carácter científico en los que se divulga conocimiento y, al mismo tiempo, existe un intercambio de información recíproco entre los diferentes grupos de trabajo. En este apartado destacan los Congresos de Biogeografía que, desde 2010 (Alicante) y hasta 2018 (Almagro, Ciudad Real), han permitido a los diferentes grupos de trabajo y, en especial al GRAMP –como pionero en la aplicación de la pedoantracología en España–, estrechar lazos y colaborar con otras universidades y grupos de trabajo para favorecer el desarrollo de la disciplina.

8.3.3. Revistas e idioma

De las 22 publicaciones seleccionadas y analizadas, un total de 10 corresponden a artículos de revistas científicas, mientras que el resto se divide entre capítulos de libros (10) y tesis doctorales (2).

Las revistas en las que se han publicado estos ensayos son: Boletín de la Asociación Española de Geografía (BAGE), Bosque, Cuadernos Geográficos y Pirineos, en lo que respecta a publicaciones en castellano; y Quaternary International y Vegetation History and Archaeobotany, en habla inglesa.

Atendiendo a los indicadores de mayor impacto según el año de publicación, los trabajos sobre pedoantracología quedarían clasificados de la siguiente manera:

- Revistas indexadas en JCR (Journal Citation Reports): 4 de las 6 revistas quedarían incluidas en este índice (Boletín de la Asociación Española de Geografía, Bosque, Quaternary International y Vegetation History and Archaeobotany). Los índices de impacto oscilan entre 0.409 (Bosque) y 2.482 (Vegetation History and Archaeobotany) – años 2017 y 2019, respectivamente–, mientras que los cuartiles lo hacen entre el Q4 (Boletín de la Asociación Española de Geografía y Bosque) y el Q2 (Vegetation History and Archaeobotany).
- Revistas indexadas en SJR (SCImago Journal Rank): el resto de revistas (Cuadernos Geográficos y Pirineos) quedan insertas en este índice, con factores de impacto que se situaban, respectivamente, en 0.216 y 0.274 durante el año 2017. Ambas revistas, por su parte, se incluyen en el Q3.

8.3.4. Ámbito de trabajo

Los primeros ensayos pedoantracológicos en España tuvieron lugar en la cara sur de la cordillera del Pirineo, a partir de los trabajos dirigidos por el GRAMP. Sin embargo, desde 2015 esta metodología empezó a aplicarse en otros sistemas montañosos españoles como la Cordillera Bética para, poco después, expandirse hacia el Sistema Central, la Cordillera Prelitoral Catalana y la Cordillera Cantábrica.

A día de hoy, y a pesar de que sigue siendo el norte de España donde se ha llevado a cabo un mayor número de trabajos de pedoantracología (54.5 %), los sistemas montañosos del sur del país –concretamente la Serranía de Ronda (Cordillera Bética)– también cuentan con una importante significación, concentrando casi el 41 % del total. Por su parte, entre las zonas consideradas, es el Sistema Central el que muestra una representación más reducida (4.5 %), con tan solo una investigación en la Sierra de Gredos (ver García-Álvarez et al., 2017).

3.5. Principales objetivos y líneas de aplicabilidad derivadas del análisis de la bibliografía consultada

Tras la revisión pormenorizada de los objetivos de todas las publicaciones consultadas, se pueden establecer las siguientes categorías principales:

- 1) Contribuir al conocimiento acerca del límite altitudinal del bosque.
- 2) Mejorar el conocimiento biogeográfico (tanto presente como pasado) sobre una especie y/o especies concretas.
- 3) Determinar las causas (naturales y antrópicas) que han provocado cambios en los paisajes de montaña.
- 4) Conocer la historia de los incendios y la evolución de la dinámica del paisaje.
- 5) Ayudar a resolver controversias fitosociológicas clásicas en las que la comunidad científica se ha encontrado tradicionalmente dividida.

Por otro lado, las principales líneas de aplicabilidad derivadas del análisis de estos trabajos serían:

- a) Consecución de información ecológica y paleoecológica a escala local.
- b) Compresión, gestión y conservación de ecosistemas de montaña.
- c) Planteamiento de modelos de conectividad ecológica.
- d) Conocimiento de la historia de los incendios, tanto naturales como antrópicos.
- e) Comparativa sobre la utilidad, ventajas e inconvenientes de diferentes fuentes a la hora de conseguir determinados objetivos.
- f) Ayuda para la protección de una/s especie/s.

8.3.6. Valores de antracomasa

Los valores de antracomasa por puntos de muestreo arrojan cifras muy dispares según se consideren unos espacios u otros. Las cifras más bajas se sitúan en valores que oscilan entre los 0.2 mg/kg del Pirineo catalán (ver Cunill, 2010; Cunill et al., 2012, 2013) y los 1373 mg/kg del Sistema Central (ver García-Álvarez et al., 2017), situándose la media de los valores más bajos de antracomasa en 626.27 mg/kg. En el otro extremo, los valores más altos se sitúan entre los 28.77 y los 137 379 mg/kg de la Cordillera Cantábrica y Cordillera Bética, respectivamente. Por su parte, la media de los valores más altos de antracomasa se sitúa en 45 838.13 mg/kg.

8.3.7. Muestreos pedoantracológicos

Dentro de este apartado se han analizado tanto el número de muestreos pedoantracológicos realizados como la litología sobre la cual se han llevado a cabo. En primer lugar, destaca la enorme variabilidad entre el número de muestreos de cada uno de los ensayos analizados. De esta forma encontramos trabajos en los que únicamente se ha llevado a cabo un solo muestreo pedológico, como por ejemplo los realizados en determinadas localizaciones del Pirineo catalán y la Cordillera Bética (ver Soriano et al., 2016; Olmedo-Cobo et al., 2017). En el primer caso, dicho muestreo forma parte de una aproximación multidisciplinar, adquiriendo de esta manera un carácter complementario. En segundo lugar, el número máximo de muestreos pedológicos realizados en un mismo ensayo se sitúa en 11 (ver Olmedo-Cobo et al., 2018, 2019a y b). La media, por su parte, quedaría en 5.375 muestreos por ensayo.

Respecto a la litología sobre la cual se han realizado las catas pedológicas, destaca sobremanera el gran peso de los materiales metamórficos (57.1 %) en el Pirineo catalán y Sistema Central (ver Cunill et al., 2008; García-Álvarez et al., 2017) e ígneos (42.9 %) en Sierra Bermeja (Cordillera Bética) (ver Gómez-Zotano et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2017), representados por esquistos, gneises y filitas en el primer caso, y peridotitas en el segundo. Por su parte, los materiales sedimentarios – fundamentalmente calizas– apenas representan un 14.3 % del total, restringiéndose únicamente a la Cordillera Cantábrica (ver Beato-Bergua et al., 2019).

8.3.8. Dataciones radiocarbónicas

El número de dataciones por ensayo ha oscilado entre 1 y 23, situándose la media en 8.3 dataciones.

Las cronologías oscilan entre edades subactuales –apenas uno o dos siglos– y 10 796 años cal BP. La media de las cronologías más recientes se sitúa en 1206.13 años cal BP, mientras que el promedio de las dataciones más antiguas –varias de ellas diez-milenarias– quedaría en 8501.58 años cal BP.

3.9. Taxones identificados

En este punto son las coníferas las que centran la atención de la mayoría de ensayos pedoantracológicos. Concretamente, el grueso de los trabajos gira en torno a especies como *Abies alba* o *Pinus sylvestris/uncinata* en el Pirineo catalán, *Taxus baccata* en la Cordillera Cantábrica o *Abies pinsapo* y *Pinus pinaster* en la Cordillera Bética. No obstante, algunas planifolias, como las del género *Betula*, también tienen un papel destacado, sobre todo en aquellas investigaciones cuyo objetivo es estudiar el límite superior del bosque o “treeline” a lo largo del Holoceno (ver Cunill, 2010; Cunill et al., 2012, 2013; García-Álvarez et al., 2017). También destacan otros géneros arbóreos como *Corylus*, *Fagus*, *Populus* y *Quercus* acompañados por *Arbutus*, *Cistus*, *Juniperus*, *Ilex* y familias como las leguminosas –

especialmente en el Sistema Central– y, en menor medida, las ericáceas, fabáceas, y rosáceas.

8.3.10 Principales dificultades encontradas durante el desarrollo de las investigaciones pedoantracológicas en España

En este apartado aparece un denominador común: el gran porcentaje de carbones vitrificados y/o en mal estado que imposibilitó cualquier tipo de identificación taxonómica. Al mismo tiempo, durante el transcurso de las investigaciones analizadas se identificaron otras dificultades que se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Características anatómicas específicas muy parecidas entre unas especies y otras, como, por ejemplo, entre *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis*, *Abies alba* y *Abies pinsapo*, y *Pinus sylvestris* y *Pinus uncinata*, siendo imposible discriminar el rango de especie en los dos últimos casos.
- Suelos que no se comportan como registros sedimentarios estratificados. Por tanto, cualquier muestra de carbón que pudiese ser objeto de interés para la investigación precisaría de una datación de forma independiente, con el consecuente coste económico.
- Valores de antracomasa reducidos y, por tanto, escasez de carbón. Si bien este hecho puede proporcionar información paleoecológica local importante –referida al papel de los incendios a lo largo del tiempo en un determinado lugar–, al mismo tiempo supone un importante déficit de información, ya que la ausencia de registros (en forma de carbones) imposibilita que pueda llevarse a cabo identificación alguna.
- Tamaño muy reducido del carbón, lo que dificulta su tratamiento e identificación taxonómica en laboratorio, limitando en muchos casos su posterior datación radiocarbónica.
- Zonas de muestreo en localizaciones montañosas alejadas de cualquier vía de comunicación, ya sea asfaltada o no, lo que requiere de largas aproximaciones a pie por terrenos irregulares. Paralelamente, el porteo de material –tanto herramientas como muestras de suelo– supone un esfuerzo extra que precisa de la colaboración entre varias personas.
- Elevado coste de las dataciones radiocarbónicas, circunstancia que limita la elección de carbones con el fin de obtener cronologías que puedan ser de interés para la investigación en cuestión.

8.3.11. Tipo de aproximación

En este apartado aparecen dos vías fundamentales: geográfica y ecológica. En el primer caso, los muestreos pedológicos se establecen en diferentes localizaciones dentro de un extenso

conjunto fisiográfico, permitiendo abarcar una amplia escala espacial. Por el contrario, en la aproximación ecológica los muestreos se concentran en una misma ladera, adquiriendo forma de transecto altitudinal.

En España es la aproximación geográfica la de mayor aplicación (68.75 %), siendo dominante en las investigaciones de la Cordillera Bética y Cordillera Cantábrica. Por su parte, la aproximación ecológica se circunscribe al Sistema Central y al Pirineo catalán (31.25 %), coincidiendo mayoritariamente con trabajos que estudian el límite superior del bosque.

8.4. Discusión

Cabe destacar que el volumen de información obtenido ha sido relativamente reducido, lo que se explica por el hecho de que la pedoantracología no ha sido una disciplina científica de larga e intensa tradición en España. Ello ha posibilitado que se pudiesen consultar de manera individualizada cada uno de los documentos con el fin de contrastar que los parámetros de búsqueda seleccionados habían generado bibliografía de interés para la presente investigación.

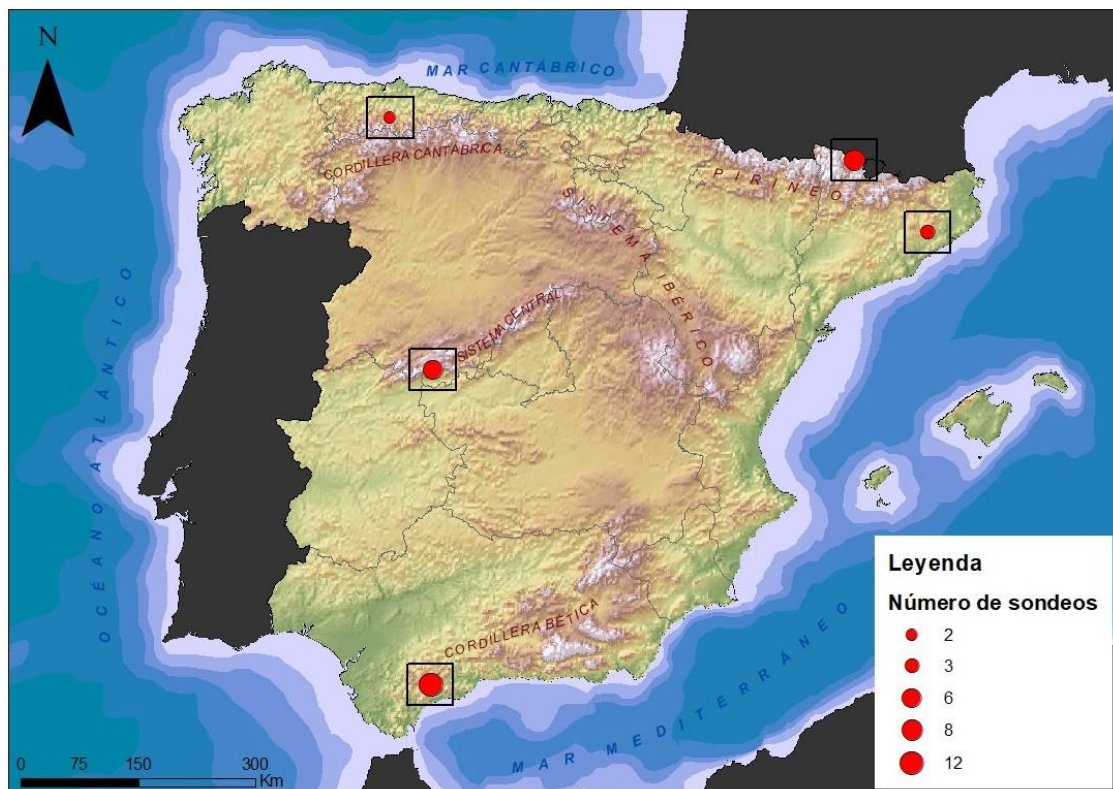
Esto difiere notablemente con lo que sucede en territorios de referencia como Francia, país pionero en la implantación de esta metodología a partir del trabajo de Thinon (1978). El país galo produce o colabora en gran parte de los ensayos pedoantracológicos realizados en Europa, tal y como se deduce de la síntesis de Nelle et al. (2013), realizada a partir del *First International Workshop* (2010), y posteriores (2013, 2017). En otros países europeos, como Italia, Alemania o República Checa también se ha desarrollado esta disciplina, si bien la producción bibliográfica en éstos es ostensiblemente más reducida que la producida por los autores franceses, donde destacan nombres como Brigitte Talon, Michel Thinon, Christopher Carcaillet y Marie-Claude Bal, entre otros.

En España, como ya se ha comentado, esta metodología fue implantada por Cunill (2010) durante el desarrollo de su tesis doctoral en el Pirineo Central catalán. No obstante, en Cunill et al. (2008) ya se hizo una primera aproximación pedoantracológica para analizar las consecuencias en el paisaje de los nuevos usos del suelo en el límite superior del bosque en el Pirineo.

Tras la aplicación pionera en la ladera sur del macizo pirenaico, los ensayos pedoantracológicos se fueron implementando paulatinamente en otros macizos montañosos del norte, centro y sur de España a lo largo de la pasada década, especialmente durante el bienio 2017-2018 (Figura 12). En el norte, son el GRAMP, de la UAB, y el GIMENA, de la Universidad de Cantabria (UC), los grupos que lideran las investigaciones de carácter pedoantracológico, si bien esta metodología forma parte de una aproximación interdisciplinar donde tienen cabida otras fuentes de información como los carbones sedimentarios o el análisis de metales pesados y polen, entre otras. En el caso del sur de España, es el grupo de investigación PMAOT (Paisaje, Medio Ambiente y Ordenación Territorial en adelante), de la

UGR, el que desarrolla el estudio pedoantracológico en el sector suroccidental de la Cordillera Bética, concretamente en el ámbito de la Serranía de Ronda (provincias de Málaga, Cádiz y Sevilla).

Figura 12. Número de muestreos pedoantracológicos según localización.



Fuente: autoría propia a partir de las capas de información del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.

De la práctica totalidad de ensayos pedoantracológicos realizados en España dimanan algunas problemáticas comunes, como el alto coste de las dataciones radiocarbónicas –que limita el número de muestras que puedan enviarse a datar–, y el elevado porcentaje de carbones vitrificados. Este último fenómeno, cuya génesis no es aún conocida dentro del panorama científico (Valchalde et al., 2011), se suma a otros como el mal estado del carbón y/o la presencia de hongos. Todo ello, en conjunto, provoca que un porcentaje muy importante de los carbones seleccionados no pueda ser identificado taxonómicamente. Esto implica que pudieran sobreestimarse o subestimarse determinados taxones, lo que se traduciría en interpretaciones paleocológicas basadas en unas proporciones que podrían no corresponderse con las reales. Paralelamente, podrían haber quedado ocultos determinados taxones que pudiesen estar presentes en aquellos carbones no identificados, lo que conllevaría una interpretación incompleta a nivel paleocológico. Todo ello a pesar de los excepcionales valores de antracomasa que presentan algunos muestreos, como los llevados a cabo por García-Álvarez et al. (2017) en la Sierra de Gredos, o los realizados por Gómez-Zotano et al. (2017) y Olmedo-Cobo et al. (2019ab) en el contexto de la Serranía de Ronda, con cifras máximas que oscilan entre los 23 487 y 137 379 mg/kg, respectivamente. No obstante, esta mayor riqueza de carbón

no se tradujo necesariamente en el buen estado de conservación del mismo, ya que en muchos casos el porcentaje de carbones no identificados supuso más del 30 % del total de las muestras analizadas (ver García-Álvarez et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2017).

Los altísimos valores de antracomasa anteriormente mencionados, que generalmente se restringen a altitudes medias y medias/altas (entre los 1000 y 2000 m s. n. m.) en localizaciones silíceas (Pirineo catalán y Sistema Central) y peridotíticas (Sierra Bermeja, en la Cordillera Bética), contrastan con las exiguas cifras de antracomasa de muestreos realizados en cotas altas del Sistema Central (piso bioclimático oromediterráneo) y el Pirineo catalán (pisos bioclimáticos alpino y subalpino). Lo mismo sucede en enclaves de naturaleza carbonatada –calizas y dolomías–, como la Cordillera Cantábrica y algunos sectores de la Cordillera Bética, donde las cifras de antracomasa son muy reducidas.

Junto a ello hay que considerar el importante papel que ha desempeñado el fuego en la configuración del paisaje vegetal de la montaña mediterránea (Bond & Keeley, 2005). En este sentido, es poco probable que bajo estos condicionantes los reducidos valores de antracomasa en localizaciones sedimentarias concretas puedan deberse a la escasa incidencia del fuego –ya sea por causas naturales y/o antrópicas–, sino que obedezcan más bien a la escasa capacidad de las litologías calizas para retener el carbón. Esta posible correlación podría jugar un papel determinante a la hora de determinar futuras zonas potenciales para llevar a cabo investigaciones de carácter pedoantracológico. No obstante, la reducida lista de ensayos pedoantracológicos realizados hasta el momento sobre materiales sedimentarios en España obliga a seguir siendo prudentes a la hora de interpretar esta posible relación.

Sea como fuere, la presencia de carbón está directamente relacionada con las perturbaciones de incendios que podrían explicar directamente los cambios pasados en las comunidades (Whitlock & Larsen, 2001). Es en este apartado donde la pedoantracología –como disciplina que se encarga de la cuantificación e identificación de carbones vegetales procedentes de suelos naturales–, ha tenido un papel muy significativo. Prueba de ello ha sido la incorporación de la disciplina como fuente complementaria para la reconstrucción de los incendios forestales, sobre todo en las investigaciones llevadas por los grupos de investigación que han trabajado en el norte de España (GRAMP y GIMENA). Desde el punto de vista de la Biogeografía, resulta esencial conocer tanto el combustible quemado como determinar la naturaleza de las perturbaciones (naturales o antrópicas) que ocasionaron aquellos incendios pretéritos (Pèlachs et al., 2016). En muchos casos, estos incendios constituyeron un factor prioritario en la génesis de determinados paisajes montañosos, tal y como se deriva de los ensayos pedoantracológicos analizados en la presente investigación.

De igual forma, la pedoantracología se ha erigido como pieza clave para el estudio en los cambios del límite altitudinal del bosque o *treeline*. Al igual que en el caso anterior –geohistoria de los incendios forestales–, también se constata una clara concentración de estos ensayos en determinados sistemas montañosos del centro y norte del país (aproximaciones ecológicas en el Sistema Central y el Pirineo catalán), mientras que ni en la Cordillera Bética ni en la

Cordillera Cantábrica se ha llevado a cabo reconstrucción alguna del límite altitudinal del bosque a partir de la pedoantracología. Su aplicación en sistemas montañosos como Sierra Nevada podría suponer la consecución de una información paleoecológica esencial para comprender el comportamiento de estos ecotonos que han marcado el límite ecológico de la vegetación arbórea a lo largo de la historia. Las variaciones en dichos límites nos pueden informar de las respuestas que ofrecen las distintas especies a los diferentes pulsos climáticos acontecidos a lo largo del Holoceno y, en ocasiones, durante el pre-Holoceno. El conocimiento de estas dinámicas pasadas puede ofrecer información clave para predecir el comportamiento del límite superior del bosque, ayudando en la gestión de determinadas especies arbóreas. Todo ello en un contexto de Cambio Global, donde los espacios de alta montaña representan los ambientes más sensibles y vulnerables (Pèlachs et al., 2017).

Tal y como muestran los resultados, el horizonte temporal cubierto por la pedoantracología es muy amplio, abarcando prácticamente la totalidad del periodo Holoceno. Así lo avalan las distintas dataciones radiocárbónicas de varios carbones cuya antigüedad máxima es de 10 796 años cal BP (ver Cunill et al., 2013), un alcance cronológico que según Carracedo et al. (2017) tan solo es igualado y/o superado por otras aproximaciones como la palinología y el estudio de carbones sedimentarios, a la hora de abordar la geohistoria de los incendios forestales.

El alcance de la pedoantracología también se extiende hacia el conocimiento paleobiogeográfico de especies arbóreas de especial interés ecológico. Tal es el caso de *Abies pinsapo* y *Taxus baccata*, coníferas que presentan actualmente una distribución menor que la que tuvieron durante los primeros albores del Holoceno, tras la última gran glaciación del Würm (Serra, 2009; Linares, 2011). En el caso del pinsapo (*Abies pinsapo*), los trabajos desarrollados por el grupo PMAOT de la UGR han revelado que este singular abeto, cuya distribución se encuentra actualmente muy reducida y fragmentada en el conjunto de la Serranía de Ronda (Cordillera Bética), presentó una extensión mayor durante el Holoceno. Así lo evidencian los registros de carbones milenarios de *Abies* sp. –muy probablemente *Abies pinsapo*– hallados en varios enclaves del macizo bético en los que este taxón está ausente en la actualidad. En este sentido, junto a la paleopoblación de Palmitera (Sierra Bermeja), habría que sumar el reciente hallazgo de carbón de *Abies* sp. –con cronologías milenarias– en la Sierra de Jarastepar, núcleo central de la Serranía de Ronda que pudo actuar como corredor natural durante las rutas migratorias de esta especie en el Holoceno. Por su parte, la aplicación pionera del método pedoantracológico en la Sierra del Aramo (Cordillera Cantábrica) ha permitido constatar la presencia del tejo (*Taxus baccata*) durante, al menos, los últimos 3450 años. La existencia de taxones arbóreos –como el tejo– en localizaciones actualmente deforestadas proporciona una información esencial para el conocimiento de la génesis de los actuales paisajes de montaña (ver Beato-Bergua et al., 2019).

Todo ello posibilita que se puedan obtener perspectivas diacrónicas detalladas a partir de las cuales se conozcan mejor los impactos antropogénicos. De esta forma, la determinación de la línea de base –escasa o nula influencia humana– de un determinado paisaje facilitará la

comprensión sobre la distribución actual de la vegetación, pudiendo predecir posibles cambios futuros (Willis et al., 2007; Jackson & Hobbes, 2009; Willis & Bhagwat, 2010). Esto resulta esencial a la hora de favorecer una gestión forestal adecuada, sobre todo en un contexto de Cambio Global como el actual. Más aún cuando las decisiones se toman sobre especies relictas en peligro de extinción, como *Abies pinsapo*. Es por ello que la pedoantracología, junto con el resto de disciplinas paleoecológicas, puede ayudar de manera sustancial al conocimiento de estas dinámicas pretéritas, favoreciendo la comprensión tanto del origen como de las diferentes perturbaciones que han generado los paisajes actuales de montaña.

8.5. Conclusiones

Tal y como queda reflejado en los diferentes ensayos pedoantracológicos analizados en la presente revisión, cada vez se apuesta de una manera más decidida por la colaboración entre las diferentes disciplinas de corte paleoecológico. De una forma u otra, en todos los ensayos pedoantracológicos realizados en España tienen cabida –aparte, lógicamente, de la pedoantracología–, otras metodologías paleoecológicas, si bien es en los trabajos realizados en el centro y norte de España donde esta complementariedad es más evidente, hecho que puede explicarse por la mayor abundancia de registros fósiles, al contrario de lo que ocurre en el tercio sur de España (López & López, 1994). Estas aproximaciones –denominadas multiproxy–, donde la pedoantracología cada vez ocupa un lugar más destacado, resultan fundamentales para la consecución de los objetivos anteriormente mencionados, ya que las limitaciones de una metodología pueden ser compensadas por las potencialidades de otra. De esta forma, la pedoantracología ha mostrado algunas ventajas frente a otras disciplinas, como son su gran precisión espacial o su aplicación en enclaves en los que es muy difícil aplicar otras metodologías (Talon, 1998). Al mismo tiempo, y tal y como muestran las investigaciones pedoantracológicas realizadas en España y revisadas en este trabajo, son las coníferas las que suscitan buena parte del interés paleoecológico (*Abies alba*, *Abies pinsapo*, *Taxus baccata* y *Pinus pinaster*). Este hecho en sí mismo puede constituir una ventaja en el sentido de que éstas, por su propia caracterización anatómica, presentan una morfología estructural mucho más simple que la que poseen las angiospermas, que además son mucho más numerosas y diversas. Por tanto, el proceso de identificación taxonómica se agiliza notablemente, al tiempo que posibilita que puedan concretarse de una manera más precisa los taxones analizados.

Si bien la pedoantracología es una disciplina de reciente tradición en España, sobre todo si la comparamos con la bibliografía de países como Francia, su aplicación durante los últimos dos lustros se ha ido extendiendo de manera progresiva por diferentes sistemas montañosos, como el Pirineo catalán, la Cordillera Prelitoral catalana, la Cordillera Cantábrica, el Sistema Central y la Cordillera Bética.

De igual manera, queda garantizada su progresiva expansión hacia otros sistemas montañosos del país, como la Sierra de Gata (Sistema Central), así como hacia nuevas localizaciones del

Macizo Asturiano (Cordillera Cantábrica) y Cordillera Bética (Sierra de Grazalema, Sierra del Pinar, Sierra de Líjar, Torcal de Antequera o Sierra de Camarolos, entre otras).

Las contribuciones derivadas de estos ensayos, en muchos casos, resultan esenciales a la hora de establecer estrategias de gestión adecuadas para determinadas coníferas, sobre todo cuando se consideraba a estas especies como introducidas –caso de *Pinus pinaster* en Sierra Bermeja–. Igualmente, y bajo el paraguas de la paleoecología, las perspectivas paisajísticas a largo plazo constituyen un mecanismo básico para poder comprender adecuadamente la génesis y evolución de determinados paisajes de montaña y, sobre ello, poder actuar eficientemente en la gestión de unos paisajes insertos en un contexto de Cambio Global.

No se trata de devolver a los ecosistemas sus condiciones de referencia, si no de conocer tanto su evolución como las diferentes perturbaciones que han ocasionado los paisajes presentes en la actualidad. El entendimiento de estas dinámicas a largo plazo debe constituir un pilar básico en la gestión de unos ecosistemas muy frágiles, como son los de la alta montaña, donde disciplinas como la pedoantracología –junto a otras aproximaciones paleológicas– han ofrecido testimonios muy precisos y útiles sobre la historia de determinados paisajes montanos en España.

Referencias

- Beato-Bergua, S. (2018). *El patrimonio natural de la Sierra del Aramo (Montaña Central Asturiana) y la evolución de su paisaje* (Tesis Doctoral). Universidad de Oviedo.
- Beato-Bergua, S. (2019). El patrimonio natural de la Sierra del Aramo (Montaña Central Asturiana) y la evolución de su paisaje (Summary of Doctoral dissertation, Universidad de Oviedo, Spain). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 2756, 1–5.
- Beato-Bergua, S., Poblete-Piedrabuena, M.A., & Cunill-Artigas, R. (2019). *Taxus baccata* en la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 1–30. <https://doi.org/10.21138/bage.2772>
- Bellot, F. & Vieitez, E. (1945). Primeros análisis polínicos en las turberas galaicas. *Anales del Instituto de Edafología, Ecología y Fisiología*, 4, 281–307.
- Bond, W.J. & Keeley, J.E. (2005). Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>
- Carcaillet, C. & Talon, B. (1996). Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons de bois dans les sols: exemple de quelques sols des Alps. *Géographie Physique et Quaternaire*, 50(2), 233–244. <https://doi.org/10.7202/033091ar>
- Carcaillet, C. & Thion, M. (1996). Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne valley (North French Alps): methodology and

- preliminary data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 91, 399–416. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00060-7)
- Carracedo-Martín, V., Cunill-Artigas, R., García-Codrón, J.C., Pèlachs-Mañosa, A., Pérez-Obiol, R. & Soriano-López, J.M. (2017). Fuentes para la geografía histórica de los incendios forestales. Algunas consideraciones metodológicas. *Cuadernos Geográficos*, 56(3), 66–89.
- Cunill, R. (2010). *Estudi interdisciplinari de l'evolució del límit superior del bosc durant el període holocènic a la zona de Plaús de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català* (Tesis Doctoral). Universidad Autònoma de Barcelona.
- Cunill, R., Pèlachs, A. & Soriano, J.M. (2008). The consequences on landscape of new land uses in the upper forest line. En Prados, M.J. (Ed.), *Naturbanization: New identities and processes for rural-natural áreas*. CRC Press/Balkema.
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A. & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(4–5), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00334-011-0342-y>
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A., Rodríguez, J.M. et al. (2013). Holocene high-altitude vegetation dynamics in the Pyrenees: a pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach. *Quaternary International*, 289, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.04.041>
- Cunill, R., Pèlachs, A., Soriano, J.M., Pérez-Obiol, R., Nadal, J. et al. (2018). Evolución paleobiogeográfica del abeto (*Abies alba*) en su límite meridional ibérico (Parc Natural del Montseny, Girona-Barcelona). En Gosálbez, R.U., Díaz, M.C., García, J.L., Serrano de la Cruz, M.A. & Jerez, O. (Eds.), *Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación. Aportaciones desde la Biogeografía* (pp. 860–868). Almud, Ediciones de Castilla-La Mancha.
- Froyd, C.A. & Willis, K.J. (2008). Emerging issues in biodiversity and conservation management: the need for a palaeoecological perspective. *Quaternary Science Reviews*, 27, 1723–1732. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.06.006>
- García-Álvarez, S., Bal, M.C., Allée, P., García-Amorena, I. & Rubiales, J.M. (2017). Holocene treeline history of a high-mountain landscape inferred from soil charcoal: The case of Sierra de Gredos (Iberian Central System, SW Europe). *Quaternary International*, 457(1), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.04.019>
- García-Codrón, J.C., Pèlachs-Mañosa, A. & Carracedo-Martín, V. (2016). Fuentes para la historia de los incendios forestales y su impacto en la vegetación: puentes y barreras metodológicas. En: Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), *Avances en Biogeografía. Áreas de distribución: entre puentes y barreras* (pp. 563–571). Editorial Universidad de Granada y Tundra Ediciones.

- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Martínez-Ibarra, E. & Cunill-Artigas, R. (2015). Descubrimiento y caracterización de una cuenca endorreica en la cumbre de Sierra Bermeja (provincia de Málaga). En De la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R. & Rodrigues, M. (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp. 1629–1638). Universidad de Zaragoza-AGE.
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Martínez-Ibarra, E. (2017). Descubrimiento y caracterización geográfica de una depresión ultramáfica en Sierra Bermeja: nuevos datos geomorfoedáficos, fitogeográficos y paleoecológicos. *Pirineos*, 172. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172001>
- Gómez-Zotano, J., Cunill-Artigas, R., Olmedo-Cobo, J.A. & Arias-García, J. (2018). Análisis pedoantracológico y propuesta de conectividad ecológica de *Abies pinsapo* en la Red Natura 2000 de Sierra Bermeja. En Gosálbez, R.U., Díaz, M.C., García, J.L., Serrano de la Cruz, M.A. & Jerez, O. (Eds.), *Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación. Aportaciones desde la Biogeografía* (pp. 635–645). Almud, Ediciones de Castilla La Mancha.
- Jackson, S.T. & Hobbes, R.J. (2009). Ecological restoration in the light of ecological history. *Science*, 325, 567–568. <https://doi.org/10.1126/science.1172977>
- Linares, J.C. (2011). Biogeography and evolution of *Abies* (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: the roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 38(4), 619–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02458.x>
- López, P. & López, J.A. (1994). Comparison of peats and archaeological samples in the Andalusian región, Spain. *AASP Contributions Series*, 29, 127–139.
- Nelle, O., Talon, B. & Robin, B. (2013). Pedoanthracology: Analysing soil charcoal to study Holocene palaeoenvironments. *Quaternary International*, 289, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.024>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2016). Nuevos datos paleoecológicos de *Abies* ssp. en el sur de España a partir del análisis pedoantracológico en Sierra Bermeja. En Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), *Avances en Biogeografía: áreas de distribución: entre puentes y barreras* (pp. 582–591). Editorial Universidad de Granada-Tundra Ediciones.
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2017). Paleoecología de *Abies* sp. en Sierra Bermeja (sur de la península ibérica) durante el Holoceno medio a partir del análisis pedoantracológico. *Bosque*, 38(2), 259–270. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200004>
- Olmedo-Cobo, J.A., Gómez-Zotano, J., Cunill-Artigas, R. & Serrano-Montes, J.L. 2018. Controversia latifolias-coníferas sobre sustratos ultramáficos: una resolución desde las

- fuentes históricas y la pedoantracología. In: Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación. Aportaciones desde la Biogeografía (eds. R.U. Gosálbez, M.C. Díaz, J.L. García, M.A. Serrano de la Cruz & O. Jerez). Almud, Ediciones de Castilla-La Mancha, pp. 242-253, Ciudad Real.
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Gómez-Zotano, J. (2019a). The native status of *Pinus pinaster* on serpentine soils: charcoal analysis and palaeoenvironmental history in Sierra Bermeja (southern Iberian Peninsula, Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*, 28, 417–432. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0701-z>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Gómez-Zotano, J. & Pardo-Martínez, R. (2019a). Aportaciones del análisis pedoantracológico al conocimiento paleoecológico de *Pinus pinaster* en el sur de España: el caso de Sierra Bermeja. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2667>
- Pèlach, A., García-Codron, J.C., Soriano-López, J.M., Pérez-Obiol, R. & Catalán-Aguilar, J. (2016). Papel de los incendios en las dinámicas forestales del Norte de la Península Ibérica durante el Holoceno. En: Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), *Avances en Biogeografía. Áreas de distribución: entre puentes y barreras* (pp. 553–562). Editorial Universidad de Granada y Tundra Ediciones.
- Pèlach, A., Pérez-Obiol, R., Soriano, J.M., Cunill, R., Bal, M.C. et al. (2017). The Role of Environmental Geohistory in High-Mountain Landscape Conservation. En Catalan, J., Ninot, J. & Aniz, M. (Eds.), *High Mountain Conservation in a Changing World. Advances in Global Change Research* (pp. 107–129). Springer.
- Rodríguez-Ariza, M.O. (2006). La antracología: métodos y objetivos. En Carta, R. (Ed.), *Arqueometría y arqueología medieval* (pp. 193–217). Editorial Universidad de Granada.
- Saulnier-Talbot, É. (2016). Paleolimnology as a Tool to Achieve Environmental Sustainability in the Anthropocene: An Overview. *Geosciences*, 6(26), 1–11. <https://doi.org/10.3390/geosciences6020026>
- Serra, L. (2009). 9580* Bosques mediterráneos de *Taxus baccata* (*). En VV.AA. (Eds.), *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- Soriano, J.M., Pèlach, A., Pérez-Obiol, R., Rodríguez, J.M. & Cunill-Artigas, R. (2016). Dinámica del abeto en el Pirineo catalán durante los últimos 10.000 años. En Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), *Avances en Biogeografía: áreas de distribución: entre puentes y barreras* (pp. 544–552). Editorial Universidad de Granada-Tundra Ediciones.

- Talon, B. (1998). *Evolution des zones supra-forestières des Alpes sud-occidentales françaises au cours de l'Holocène – analyse pédoanthracologique* (Tesis Doctoral). Aix-Marseille Université.
- Talon, B., Carcaillet, C. & Thion, M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Geographie Physique et Quaternaire*, 52(2), 195–208. <https://doi.org/10.7202/004875ar>
- Thion, M. (1978). La pédoanthracologie: Une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le Néolithique. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 287, 1203–1206.
- Thion, M. (1992). *L'analyse pédoanthracologique. Aspects méthodologiques et applications* (Tesis Doctoral). Université Aix-Marseille III.
- Turner, R., Roberts, N. & Jones, M.D. (2008). Climatic pacing of Mediterranean fire histories from lake sedimentary microcharcoal. *Global and Planetary Change*, 63(4), 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.07.002>
- Unger, D.F. (1846). Pflanzengeschichtliche Bemerkungen über den Kaiserwald bei Grätz. *Botanische Zeitung*, 7(17), 313–321.
- Uzquiano, P. (1997). Antracología y métodos: implicaciones en la economía prehistórica, etnoarqueología y paleoecología. *Trabajos de Prehistoria*, 54(1), 145–154. <https://doi.org/10.3989/tp.1997.v54.i1.383>
- Vargas-Jiménez, I. (2012). La entrevista en la investigación cualitativa: nuevas tendencias y retos. The interview in the qualitative research: trends and challengers. *Revista Electrónica Calidad En La Educación Superior*, 3(1), 119–139.
- Vaschalde, C., Durand, A. & Thiriot, J. (2011). Vitrification and craft fire in occidental Mediterranean. Describing characteristics, first results and research hypothesis. En Badal, E., Carrión, Y., Grau, E., Macias, M. & Ntinou, M. (Eds.), *Saguntum: Papeles del Laboratorio de Arqueología de Valencia. 5th International Meeting of Charcoal Analysis; The charcoal as cultural and biological heritage* (pp. 19–20). Departament de Prehistòria i Arqueologia de la Universidad de Valencia.
- Willis, K.J. & Birks, H.J. (2006). What is natural? The need for a long-term perspective in biodiversity conservation. *Science*, 314(5803), 1261–1265. <https://doi.org/10.1126/science.1122667>
- Willis, K.J., Araújo, M.B., Bennett, K.D., Figueroa-Rangel, B., Froyd, C.A. et al. (2007). How can a knowledge of the past help to conserve the future? Biodiversity conservation and the relevance of long-term ecological studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 362(1478), 175–187. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1977>

Willis, K.J. & Bhagwat, S.A. (2010). Questions of importance to the conservation of biological diversity: answers from the past. *Climate of the Past*, 6, 759–769. <https://doi.org/10.5194/cp-6-759-2010>

Whitlock, C. & Larsen, C. (2001). Charcoal as a fire proxy. En Smol, J.P., Birks, H.J.B. & Last, W.M. (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators* (pp. 75–97). Last. Kluwer Academic.

9. PRIMEROS DATOS SOBRE LA COMPOSICIÓN HOLOCENA DE LOS BOSQUES DE MONTAÑA EN EL PARQUE NATURAL DE LA SIERRA DE LAS NIEVES (SERRANÍA DE RONDA) A PARTIR DEL ANÁLISIS PEDOANTRACOLÓGICO

Resumen

En este trabajo se presentan los primeros datos de la composición holocena de los bosques de montaña en el Parque Natural Sierra de las Nieves (Málaga, España). La información colectada se obtiene de la aplicación del método pedoantracológico en 10 enclaves del macizo, con el objeto de obtener una primera aproximación paleoecológica a este territorio a partir de la búsqueda de carbón vegetal procedente de incendios forestales o quemas antrópicas en suelos naturales. La identificación de los fragmentos recuperados y su posterior datación radiocarbónica han permitido el hallazgo de diferentes paleopoblaciones de coníferas en el área de estudio, la comprobación de la antigüedad de determinados bosques y su consideración, por tanto, como paleoendémicos, y adquirir un primer conocimiento acerca de las dinámicas forestales en relación a ciclos climáticos y alteraciones antrópicas. La implementación de los resultados en la gestión conservacionista y adaptativa de los bosques más amenazados y sus hábitats, frente al cambio climático, debe ser una prioridad en el marco de los espacios naturales protegidos de la RED NATURA 2000.

Palabras clave: *Abies pinsapo*; *Quercus alpestris*; paleoecología; carbón; Holoceno.

Abstract

In this work, the first data on the Holocene composition of mountain forests in the Sierra de las Nieves Natural Park (Málaga, Spain) are presented. The information collected is obtained from the application of the pedoanthracological method in 10 enclaves of the massif, in order to obtain a first paleoecological approach to this territory from the search for charcoal from forest fires or anthropic burns in natural soils. The identification of the recovered fragments and their subsequent radiocarbon dating have allowed the discovery of different paleopopulations of conifers in the study area, the verification of the antiqueness of certain forests and their consideration, therefore, as paleoendemic formations, and to acquire a first knowledge about of forest dynamics in relation to climatic cycles and anthropic alterations. The implementation of the results in the conservationist and adaptive management of the most threatened forests and their habitats, in the face of climate change, should be a priority within the framework of the protected natural spaces of the NATURA 2000 NETWORK.

Keywords: *Abies pinsapo*; *Quercus alpestris*; paleoecology; charcoal; Holocene.

9.1. Introducción

El análisis de las relaciones especies-ambientes es un tema prioritario en cualquier disciplina ecológica (Guisan & Zimmermann, 2000) y, en el caso concreto de las investigaciones

biogeográficas, la comprensión de cómo y por qué los organismos biológicos se distribuyen en el espacio es un principio central (Miller, 2010). Un conocimiento adecuado acerca de la distribución de las especies presentes en un territorio es fundamental para evaluar la biodiversidad regional, si bien en muchos casos los datos existentes son insuficientes (Choe et al., 2016). De este modo, el verdadero estado de numerosos taxones vegetales en peligro de extinción es incierto porque no se conocen las ubicaciones y el estado de conservación de todas las poblaciones existentes (McCune, 2016). Particularmente importante resulta la preservación de las especies amenazadas en los ámbitos más susceptibles al cambio global. En este sentido, se considera que las zonas con características microclimáticas y, por tanto, diferentes a las del resto del área circundante, desempeñan un papel crítico para la conservación de los taxones en mayor riesgo, constituyendo potencialmente importantes áreas para salvaguardar la diversidad biológica (Hannah et al., 2014). Así sucede con los cinturones orófilos, donde se asientan diversos tipos de bosque que constituyen el límite forestal superior, caracterizados por complejas interacciones entre vegetación, suelo, topografía, clima y, si los hubiere, regímenes de perturbación antrópica, constituyéndose un espacio muy singular a nivel ecológico que atesora una alta riqueza de especies y formas de vida (Compostella et al., 2013; Llambí, 2015). El ecotono que se genera entre los bosques desarrollados a mayor altitud y los pisos de vegetación superiores, de tipo arbustivo y herbáceo, se convierte, asimismo, en una interfase que presenta una gran complejidad ecológica y una notable heterogeneidad en sus características y patrones de distribución (Becker et al., 2007; Holtmeier & Broll, 2007; Cunill et al., 2012).

Los bosques de montaña constituyen, por tanto, límites ecológicos que son considerados como excelentes laboratorios para el estudio de los componentes y procesos del cambio global, tanto espaciales como temporales, y, además, su análisis aporta visiones complementarias que permiten realizar una interpretación paleoclimática y paleoambiental (Cunill et al., 2013; Saltré et al., 2013). Se trata de bosques que se erigen como fronteras ambientales de enorme singularidad y vulnerabilidad en la actualidad frente al cambio climático (Kimball & Weihrauch, 2000; Batllori et al., 2009), siendo las respuestas de los ecosistemas de alta montaña a las perturbaciones ambientales las primeras que se detectan (Hansen & di Castri, 1992; Kullman, 1998). Asimismo, hay consenso general de que los bosques de montaña son magníficos indicadores de otros tipos de cambios, como son los provocados por el ser humano, si bien resulta en algunos casos una tarea compleja separarlos de las alteraciones puramente climáticas (Holtmeier & Broll, 2007). Efectivamente, desde tiempos prehistóricos la especie humana ha modificado su entorno de diferentes formas para aprovechar los recursos disponibles (Galop, 1998; Walsh et al., 2006; Ejarque et al., 2010).

En el caso de la región Mediterránea, esta se ha diagnosticado como una de las áreas más vulnerables frente a los procesos de cambio ambiental que ya está experimentando, debido al calentamiento y desecación de su clima (Giorgi, 2006). Este hecho adquiere gran relevancia al constituir el segundo *hotspot* de biodiversidad del mundo, con 13 000 especies vegetales endémicas, y donde aparecen representadas el 10 % de las plantas superiores del planeta en

una superficie que tan solo es del 1.6 % del total (Médail & Quézel, 1997). En concreto, se prevé que sus cordilleras se vean más expuestas al cambio climático que otras áreas de montaña de la Tierra, llegando a ser significativamente más cálidas y secas durante el presente siglo (Thuiller et al., 2005; Giorgi, 2006). En este contexto, se espera que las franjas altitudinales superiores sean las zonas más afectadas en cuanto a pérdida de biodiversidad debido a la imposibilidad de migración en altitud de muchas de las especies que ahí se desarrollan (Quézel & Médail, 2003; Huber et al., 2006; Cheddadi et al., 2017). En el caso de los bosques orófilos, la migración en altitud de sus árboles integrantes ya es una realidad en los Alpes (véanse, por ejemplo, los trabajos de Tinner & Theurillat, 2003; Talon, 2010; Berthel et al., 2012; Ferrarini, et al., 2017), en los Apeninos (Compostella et al., 2013), en el Pirineo (Cunill et al., 2012) o la Sierra de Gredos (García et al., 2017), lo que supone un proceso ecológico de consecuencias imprevisibles. En este caso, además, se trata de ámbitos largamente humanizados, en los que uno de los métodos más utilizados para la “culturización” de la naturaleza ha sido el uso del fuego, práctica que ha resultado común para conseguir ecosistemas más abiertos mediante la sustitución de los bosques de montaña por pastos aprovechables por el ganado y, responsable, por tanto, de la configuración de numerosos paisajes vegetales orófilos (Mouillot et al., 2003; Ajbilou et al., 2006; Cunill et al., 2012; Tinner et al., 2016). Por otra parte, existen excepciones significativas y son todavía numerosas las incertidumbres sobre el papel que el clima ejercerá en el futuro (Holtmeier & Broll, 2007; Harsch et al., 2009).

Por tanto, la necesidad de conocer cómo se adaptan los ecosistemas vegetales más susceptibles frente al cambio global se ha convertido en una prioridad en los últimos años, y ha suscitado gran interés en la comunidad científica, existiendo una amplia literatura al respecto (véase, por ejemplo, respecto a los bosques en España, la obra recopilatoria de Herrero & Zavala, 2015). En las últimas décadas, una de las fuentes de información más relevantes en este sentido proviene de las disciplinas paleoecológicas, que en conjunto se consideran de gran ayuda para la gestión de la conservación en la actualidad al proporcionar datos ecológicos pretéritos que cubren una gran escala temporal (siglos o milenios), complementando la información derivada del monitoreo ecológico (Davies & Bunting, 2010). En el caso concreto de la flora, las principales metodologías que se encargan de su estudio en términos paleobotánicos, así como de la evolución de la vegetación en épocas pretéritas, son los análisis polínicos (Tinner & Theurillat, 2003; Vescovi et al., 2010), de microfósiles de plantas (Nicolussi et al., 2005; Birks & Bjune, 2010) y de carbones no arqueológicos presentes en el suelo –pedoantracología– (Carcaillet & Brun, 2000; Ali et al., 2005; Talon, 2010).

En concreto, la pedoantracología (búsqueda, identificación y datación de carbones vegetales no arqueológicos encontrados en el suelo natural), su aplicación es especialmente oportuna en la región mediterránea debido al ancestral uso del fuego en este territorio. En este sentido, los suelos constituyen un incomparable archivo paleoecológico en el que los carbones procedentes de incendios forestales permiten reconstruir con gran precisión espacial la historia de la vegetación leñosa incendiada (Carcaillet & Talon, 1996; Talon et al., 1998; Cunill et al., 2012,

2015). Por tanto, se trata de una herramienta clave para conocer la composición y la dinámica ecológica de los bosques en el pasado; además, la información obtenida permite analizar si las alteraciones detectadas obedecen a cambios climáticos u otras contingencias naturales o bien establecer el posible origen antrópico de las mismas.

En España, la pedoantracología es una disciplina todavía novel en el escenario científico, ya que las investigaciones paleobiogeográficas de base metodológica pedoantracológica han sido escasamente implementadas (véase la revisión bibliográfica que al respecto hace Pardo-Martínez, 2020). En el caso concreto de la Cordillera Bética, los únicos antecedentes pedoantracológicos han sido publicados previamente por Gómez-Zotano et al. (2017) y Olmedo-Cobo et al. (2017, 2019ab), y cuyos resultados demuestran que esta metodología es gran utilidad para el estudio de especies arbóreas integrantes de bosques de montaña béticos, como es el caso de *Abies pinsapo* o *Pinus pinaster*.

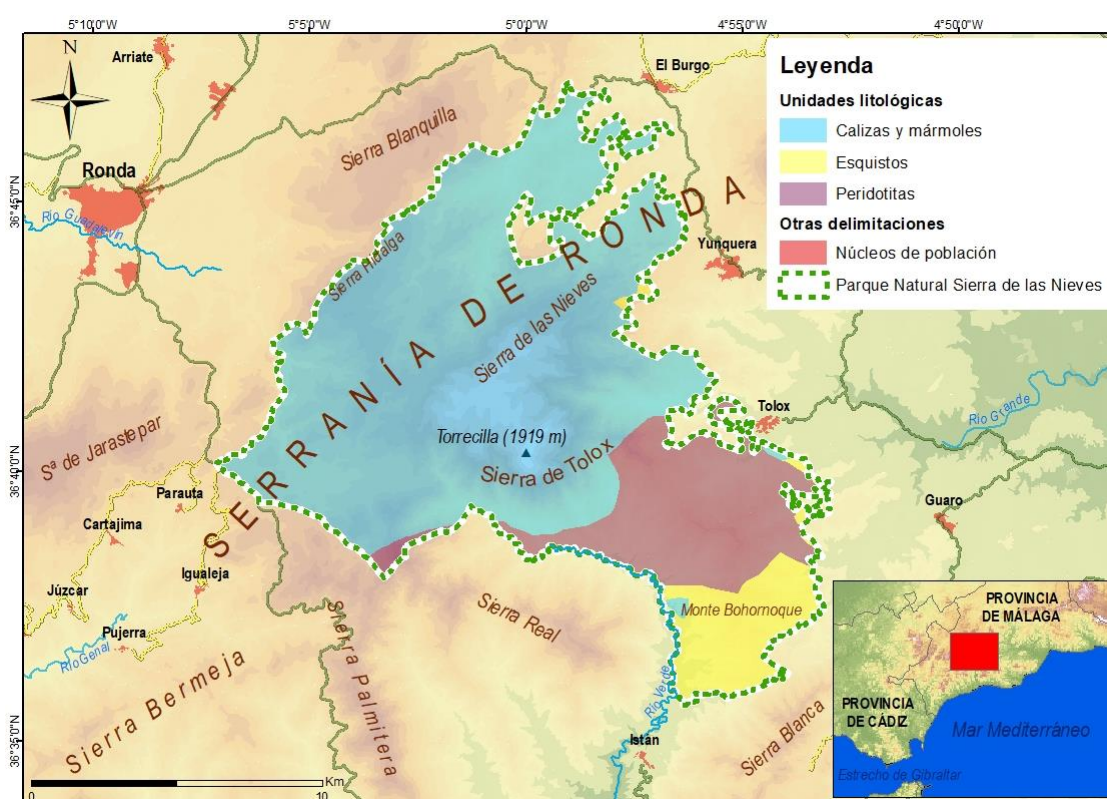
En el ámbito de estudio del presente trabajo, el Parque Natural Sierra de las Nieves, solo existe un estudio de corte paleoambiental basado en el análisis de pólenes (véase Alba-Sánchez et al., 2019), que sin embargo únicamente abarca el periodo –histórico– comprendido entre el año 1180 y el presente. Este déficit de conocimiento paleoecológico se agrava dada la presencia de singulares, únicos y amenazados bosques de montaña de carácter paleoendémico, como son los abetales de *A. pinsapo* y los quejigales de montaña de *Quercus alpestris*. Para subsanar esta carencia, se ha aplicado por primera vez el método pedoantracológico en este espacio protegido de la Serranía de Ronda, partiendo de una doble hipótesis: en primer lugar, y dada la significación de la especie, el hecho de que, con gran probabilidad, el área de distribución pretérita de los abetales de *A. pinsapo* fuese más extensa que la actual en el territorio objeto de estudio, tal y como han señalado diversos autores (véase, por ejemplo, a Linares, 2011); y, en segundo lugar, la creencia de que la cohorte de especies arbóreas integrantes de los bosques era más rica y diversa en el pasado o, al menos, de que existía una mayor representatividad espacial de los distintos taxones, que habría ido disminuyendo con el retraimiento forestal acaecido a lo largo del Holoceno. De esta forma, el objetivo general de la investigación es alcanzar una aproximación inicial al conocimiento de la composición florística y dinámica de los bosques de este ámbito en el pasado, y el hallazgo de nuevas paleopoblaciones de aquellas especies hoy consideradas relictas, que aparecen refugiadas allí donde se conservan unas mínimas condiciones ecológicas favorables para su desarrollo. Una información que, además de su valor intrínseco, puede ser implementada y servir de apoyo a la gestión adaptativa y a las estrategias de conservación de estas y otras especies y comunidades amenazadas por el cambio global.

9.2. Metodología y área de estudio

9.2.1. Área de estudio

La Sierra de las Nieves constituye el techo de la Serranía de Ronda con 1919 m s.n.m. (Figura 13). Desde 1989 forma parte de la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA), bajo la figura de parque natural. El espacio protegido, con una extensión de 20 132 ha, abarca un conjunto montañoso de naturaleza carbonatada (Sierra de Tolox, Sierra de las Nieves, Sierra Hidalga), ultramáfica (Sierra Bermeja) y esquistosa (Monte Bohornoque). La geodiversidad y una orografía accidentada con predominio de fuertes pendientes condicionan el desarrollo de leptosoles e inceptisoles y, en menor medida, alfisoles, molisoles y vertisoles.

Figura 13. Ámbito de estudio.



Fuente: autoría propia a partir de las capas de información del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.

Olmedo-Cobo & Gómez-Zotano (2017) identifican en este espacio una variedad climática mediterránea de carácter semi-continental subhúmedo-húmeda, con condiciones de alta montaña en las cumbres. Las diferencias altitudinales existentes en el macizo, comprendidas entre los 220 y los 1919 m s. n. m. del valle del río Verde y del pico Torrecilla respectivamente, permiten identificar cuatro zonificaciones bioclimáticas principales: termo y mesomediterráneo seco a húmedo, supramediterráneo subhúmedo a hiperhúmedo y, restringido únicamente al entorno del pico Torrecilla, oromediterráneo hiperhúmedo. Desde el punto de vista biogeográfico, el espacio protegido de la Sierra de las Nieves se reparte entre los sectores

Rondeño y Bermejense de la provincia Bética (región Mediterránea, reino Holártico) (Rivas-Martínez, 2011).

La situación estratégica de este territorio, en un área de encrucijada geográfica, lo ha hecho partícipe de todos los avatares paleoecológicos e históricos experimentados por la región mediterránea occidental, lo que, junto a su amplio rango altitudinal y diversidad de sustratos litológicos, permiten entender la riqueza botánica y diversidad florística de las fitocenosis que integran el macizo. Acorde con su situación en uno de los principales centros de biodiversidad de la región Mediterránea, el que conforman las cordilleras ibero-magrebís Bética, Atlas y Rif (Médail & Quézel, 1997), se reconocen más de 1400 taxones y cerca de 80 asociaciones y comunidades vegetales, destacando las de tipo forestal (alcornocales, encinares, quejigales, robledales, abetales, pinares) (Pérez-Latorre et al., 1998). Esta notable biota vegetal incluye algunos de los endemismos de área restringida de mayor significación y más amenazados de la región Mediterránea, tales como los anteriormente referidos *A. pinsapo* y *Q. alpestris* (Figuras 14 y 15 respectivamente), además de otros como *Atropa baetica*, *Narcissus bugei*, *Sarcocapnos baetica* subsp. *baetica* y *Taxus baccata* (Blanca et al., 1999; Cabezudo et al., 1998; Cabezudo & Talavera, 2005; Pérez-Latorre et al., 2020).

Figura 14. Bosque abierto de *Abies pinsapo* en las inmediaciones de la Cañada de Enmedio (P.N. Sierra de las Nieves), en un entorno en el que predomina una intensa deforestación del medio.



Fuente: José Gómez Zotano.

Figura 15. Rodal abierto y desestructurado de *Quercus alpestris* en el Puerto de Pilonos (P. N. Sierra de las Nieves).



Fuente: autoría propia.

La riqueza vegetal y su grado de amenaza han atraído la atención de numerosos científicos y naturalistas en los últimos dos siglos, convirtiéndose en uno de los espacios más estudiados del sur de España por botánicos y geógrafos. Destacan, las aportaciones de algunos de los naturalistas pioneros en dar a conocer la flora suribérica en el siglo XIX, tales como Simón de Rojas Clemente, Felix Haenseler o Edmund Boissier (véanse los trabajos de Cabezudo et al., 1998 o de Gil, 2002). Desde entonces, y hasta las aportaciones más recientes (Casimiro Soriguer et al., 2019; Pérez-Latorre et al., 2020), gran cantidad de producción y literatura científica ha permitido un profundo conocimiento de la composición, estructura, estado de conservación y grado de amenaza de la flora y vegetación del ámbito de estudio.

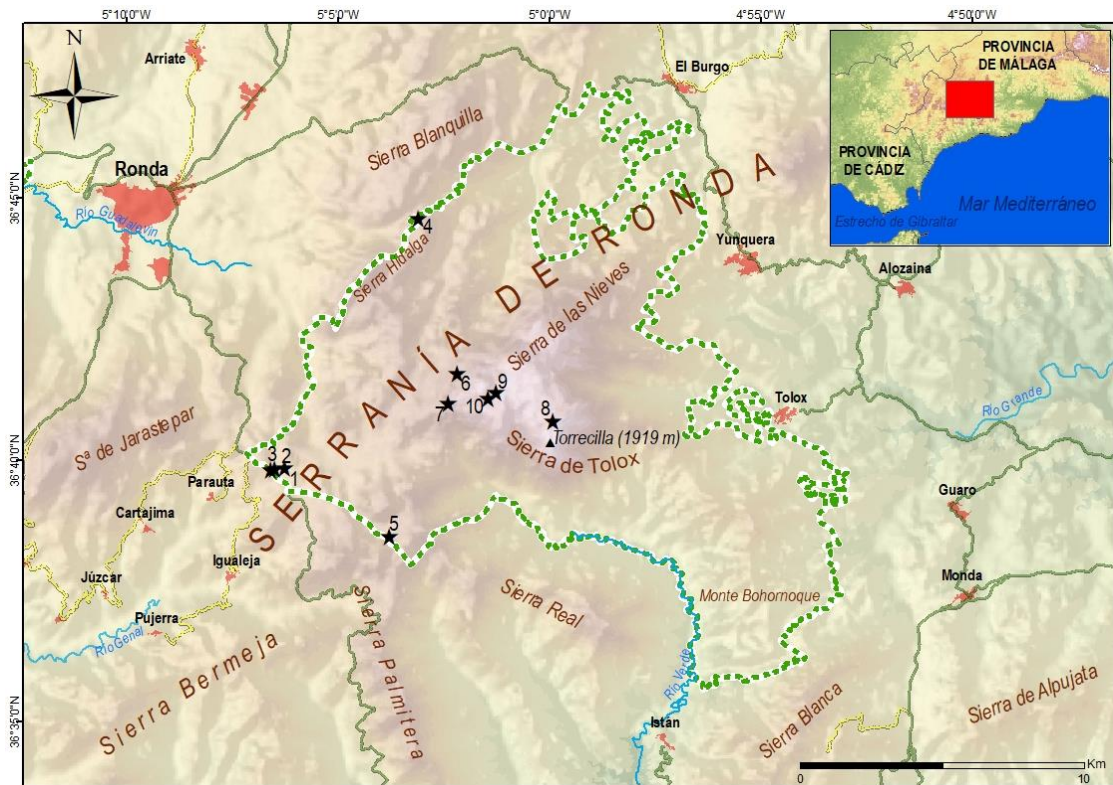
El sobresaliente conjunto de valores naturales y, en particular, vegetales, y el notable grado de amenaza al que se ven sometidos estos últimos, explica que el Parque Natural Sierra de las Nieves esté incluido en varias redes de protección ambiental desde su declaración en 1989: Reserva Mundial de la Biosfera de la UNESCO en 1995, Zona de Especial Protección para las Aves desde 2003, Lugar de Importancia Comunitaria desde 2006 y Zona Especial de Conservación desde 2012 en la RED NATURA 2000 y Reserva de la Biosfera Intercontinental del Mediterráneo desde 2006. A ello se suma la reciente propuesta para su integración en la Red de Parques Nacionales de España (OAPN, 2018; BOJA nº 233, de 3.12.2018).

9.2.2 Metodología

El método pedoantracológico consiste en el análisis de los carbones vegetales encontrados en suelos naturales y que proceden de incendios forestales o quemas antrópicas, con el objeto de identificar las especies o géneros de los que proceden las muestras recopiladas. Posteriormente, la datación radiocarbónica permite obtener cronologías de antigüedad de los fragmentos recuperados. En la presente investigación, el método ha seguido las pautas desarrolladas por los autores en trabajos precedentes a partir de los protocolos propuestos por Cunill et al. (2013), y que consisten en las siguientes fases de trabajo:

- Muestreos edáficos (trabajo de campo): recogida de muestras de suelo en puntos estratégicos previamente identificados en función de los objetivos de la investigación. En cada muestreo se definen varios niveles de muestreo a partir de la profundidad del perfil y según las características del suelo, recogándose entre 3 y 10 kg por nivel.
- Tamizado con agua (en adelante, trabajo de laboratorio): tras el pesaje de las muestras recogidas en campo, se procede a su cribado (paso de malla de 0.8, 2 y 5 mm), para la posterior separación de los restos de carbón, si los hubiere, de la fracción mineral atrapada en cada tamiz.
- Triado del carbón recuperado: selección manual del carbón en cada una de las tres cribas mediante el empleo de lupa binocular. La fracción mineral recogida en el tamiz de 5 mm es pesada para el posterior cálculo de antracomasa, que relaciona el peso en miligramos del carbón recuperado en cada nivel de muestreo con el peso en kilogramos de la muestra una vez se le resta a esta el peso del material mineral atrapado –sobrante– en la luz de malla de 5 mm.
- Identificación taxonómica: en función del número de carbones recuperados por nivel de muestreo, se realiza una selección para su identificación mediante el empleo de un microscopio óptico de luz reflejada. Para ello, se han utilizado como fuentes de apoyo diversos atlas de anatomía comparada de la madera (Jaquiot et al., 1973; Schweingruber, 1990; Vernet et al., 2001; García et al., 2003) y la colección de maderas carbonizadas disponibles en el laboratorio de Geografía Física de la Universidad de Granada. En este caso, el número máximo de carbones identificados por cada nivel de muestreo ha sido de 50 fragmentos.
- Datación radiocarbónica de fragmentos de carbón: tras la identificación, y siempre partiendo de los objetivos de la investigación, se procede a la selección de un número determinado de muestras de carbón para su datación en laboratorios especializados, en este caso en el Poznan Radiocarbon Laboratory (Poznan, Polonia) y en el Alfred-Wegener-Institut (Bremerhaven, Alemania). Posteriormente, una vez obtenidas las cronologías, estas se calibran con el programa Oxcal 4.3 y la base de datos IntCal13 (Reimer et al., 2013), 2 sigma (95 % probabilidad).

Figura 16. Muestréos pedológicos realizados durante el trabajo de campo (1. Navacillo 1; 2. Navacillo 2; 3. Navacillo 3; 4. Puerto de Lifa; 5. Fuenfría Alta; 6. Cañada de Enmedio; 7. Cañada del Cuerno; 8. Puerto de los Valientes; 9. Pilonos 1; 10. Pilonos 2).



Fuente: autoría propia a partir de las capas de información del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía.

La selección de muestras para su datación ha seguido un criterio básicamente ecológico acorde a los objetivos de la investigación. En este sentido, los fragmentos sometidos a la prueba del C^{14} han correspondido únicamente a árboles y, en particular, a aquellos que se han considerado más concluyentes para intentar caracterizar la composición pretérita de los bosques en el territorio objeto de estudio. Asimismo, también ha sido decisivo para la elección de las muestras a datar el tamaño y la abundancia de los fragmentos recopilados, obviándose aquellas muy pequeñas por la imposibilidad de ser sometidas al tratamiento radiocarbónico y seleccionando los carbones con relativa fidelidad a su significación en el conjunto de muestras recopiladas. En concreto, en esta investigación, han sido 10 los puntos de muestreo pedológico llevados a cabo en el Parque Natural Sierra de las Nieves (Figura 16), en otros tantos enclaves con condiciones geo-ecológicas bien contrastadas entre sí, que han permitido cubrir diferentes emplazamientos vegetales, litoedáficos, topográficos y altitudinales, alcanzando los muestreos efectuados profundidades de entre 38 y 108 cm, determinando de 2 a 5 niveles de muestreo (Tabla 3 y Figura 16).

Tabla 3. Georreferenciación y condiciones geocológicas de las localidades donde se han efectuado los muestreos pedológicos.

Localidad	Coordenadas geográficas	Altitud (m s.n.m.) y orientación-piso bioclimático	Ambiente geocológico	Litología -tipo de suelo
Navacillo 1	36°39'58"N 05°06'04"W	1123-NW Mesomediterráneo subhúmedo	Encinar en regeneración en ladera	Caliza Leptosol-cambisol
Navacillo 2	36°39'56"N 05°06'16"W	1041-NNE Mesomediterráneo subhúmedo	Matorral con encinas y pinos resineros aislados en vaguada	Dolomía-caliza Regosol
Navacillo 3	36°39'55"N 05°06'22"W	1041-NNE Mesomediterráneo subhúmedo	Espinal preforestal-matorral con encinas aisladas en ladera	Dolomía-caliza Regosol
Puerto de Lifa	36°44'46"N 05°03'01"W	1173-NWN Mesomediterráneo subhúmedo	Espinal preforestal en ladera	Caliza Cambisol
Fuenfría Alta	36°38'13"N 05°03'23"W	1217-WNW Mesomediterráneo subhúmedo	Pinar de repoblación en ladera	Gneis Regosol
Cañada de Enmedio	36°41'52"N 05°01'59"W	1385-NW Supramediterráneo húmedo	Abetal en ladera	Caliza Regosol-leptosol
Cañada del Cuerno	36°41'15"N 05°02'05"W	1444-WNW Supramediterráneo húmedo	Abetal con encinas y quejigos aislados en ladera	Caliza Leptosol-regosol
Puerto de los Valientes	36°40'55"N 04°59'44"W	1685-N Supramediterráneo húmedo-hiperhúmedo	Quejigal abierto en ladera	Caliza-margocaliza Regosol-cambisol
Pilones 1	36°41'28"N 05°01'05"W	1744-SSE Supramediterráneo húmedo-hiperhúmedo	Quejigal abierto con pinsapo aislados en ladera	Caliza Leptosol-regosol
Pilones 2	36°41'20"N 05°01'15"W	1732-SE Supramediterráneo húmedo-hiperhúmedo	Quejigal abierto con pinsapo aislados en ladera	Caliza Leptosol-regosol

Fuente: autoría propia.

9.3. Resultados

9.3.1 Análisis de antracomasa por punto de muestreo

Se ha encontrado carbón en todos los muestreos efectuados y, en concreto, en 32 de los 34 niveles diferenciados en el conjunto (Tabla 4). Todos los fragmentos recuperados tienen un tamaño superior a 0.8 mm (téngase en cuenta que el paso de malla de los tamices utilizados fue de 5, 2 y 0.8 mm). En general, son los niveles intermedios y superiores de los muestreos (I, II) los que han permitido recuperar mayor cantidad de carbón, si bien en determinados niveles profundos la tasa de carbón ha sido máxima (así ha sucedido en Fuenfría Alta y Cañada de Enmedio). Las mayores tasas absolutas de antracomasa, que en cualquier caso presentan

valores modestos, se han encontrado en los muestreos de Fuenfría Alta (1039.4 mg/kg) y Cañada de Enmedio (651.7 mg/kg), mientras que, por el contrario, los muestreos de Navacillo 1 y 2, Puerto de Lifa y Cañada del Cuerno han sido los que han presentado valores más bajos, siendo el carbón testimonial (<40 mg/kg).

Tabla 4. Profundidad, niveles de muestreo y tasas de antracomasa en cada uno de los puntos de muestreo efectuados.

Localidad	Profundidad del muestreo (cm)	Niveles de muestreo y profundidad (cm)	Antracomasa (mg/kg)
Navacillo 1	48 (4)	I (0-10)	12.5
		II (11-25)	25
		III (26-38)	2.2
		IV (39-48)	0
Navacillo 2	90 (4)	I (0-21)	7.2
		II (22-44)	14.5
		III (45-71)	0,3
		IV (72-90)	0
Navacillo 3	85 (5)	I (0-16)	30.6
		II (17-33)	35.4
		III (34-55)	22.7
		IV (56-72)	32.5
		V (73-85)	15.3
Puerto de Lifa	60 (3)	I (0-19)	4.9
		II (20-37)	2.1
		III (38-60)	2.6
Fuenfría Alta	94 (4)	I (0-13)	122.5
		II (14-35)	192.1
		III (36-77)	128.8
		IV (78-94)	208.2
Cañada de Enmedio	45 (3)	I (0-13)	271.1
		II (14-30)	294.5
		III (31-45)	473.8
Cañada del Cuerno	38 (2)	I (0-17)	15.1
		II (18-38)	12.4
Puerto de los Valientes	108 (4)	I (0-18)	226.9
		II (19-58)	155.8
		III (59-78)	35
		IV (79-108)	57.8
Pilones 1	52 (2)	I (0-21)	13.6

		II (22-52)	104.8
Pilonos 2	80 (3)	I (0-24)	87.1
		II (25-54)	44
		III (55-80)	11.9

Fuente: autoría propia.

A continuación, se comenta detalladamente las tasas de antracomasa absolutas y parciales por nivel de muestreo en cada uno de los muestreos efectuados.

- Navacillo 1. Este punto de muestreo, en el que se definieron 4 niveles edáficos (profundidad total de 48 cm), presentó una antracomasa total de 39.7 mg/kg, con un máximo de 25 mg/kg en el nivel II; se trata de una tasa muy baja que permite considerar el carbón recuperado como residual, sin que se encontrasen fragmentos en el nivel más profundo (IV).
- Navacillo 2. Al igual que en el anterior, en este muestreo el carbón recuperado fue testimonial, con una tasa total de 22 mg/kg en el total de los 4 niveles edáficos considerados (profundidad de 90 cm), siendo de nuevo el nivel II el más productivo (14.5 mg/kg), y también sin fragmentos en el nivel más profundo (IV).
- Navacillo 3. En el conjunto de los 5 niveles de muestreo de esta cata (85 cm de profundidad), la antracomasa global entregó un modesto valor de 136.5 mg/kg, siendo una vez más el nivel II el que permitió recuperar una mayor cantidad de carbón (35.4 mg/kg).
- Puerto de Lifa. Este muestreo fue en el que se encontró una menor tasa de carbón de todos los realizados en el Parque Natural, con una antracomasa total de 9.6 mg/kg (máximo de 4.9 mg/kg en el nivel I) considerando los 3 niveles de recogida de suelo (profundidad total de 60 cm).
- Fuenfría Alta. El muestreo supuso la determinación de hasta 4 niveles edáficos, con una profundidad total de 94 cm. En cada uno de estos niveles se encontró carbón vegetal, con tasas modestas de antracomasa –aunque superiores a las de los puntos anteriores– que oscilaron entre 122.5 y 208.2 mg/kg (651.7 mg/kg en total).
- Cañada de Enmedio. Fueron 3 los niveles de muestreo tomados en consideración en este punto, dentro de un perfil de suelo con una profundidad de 45 cm, apareciendo de nuevo carbón en todos los horizontes diferenciados. En este caso, en el nivel III es donde se ha encontrado una mayor tasa de antracomasa, con un valor de 473.8 mg/kg, que además es la mayor tasa de carbón en el conjunto de todos los niveles de muestreo de las 10 catas pedológicas efectuadas en el parque natural; por su parte, en los niveles I y II los valores obtenidos fueron de 271.1 y 294.5 mg/kg respectivamente (totalizando 1039.4 mg/kg).

- Cañada del Cuerno. Muy escaso fue el carbón que se encontró en este punto de muestreo (27.5 mg/kg) en los 2 niveles para la recogida de muestra de suelo que se discriminaron (profundidad total de 38 cm); la antracomasa parcial más alta fue la del nivel superior (I), con una exigua tasa de 15.1 mg/kg.
- Puerto de los Valientes. Este muestreo presentó unos valores de antracomasa total de 475.7 mg/kg, siendo 4 los niveles de muestreo definidos –profundidad total de 108 cm–, resultando el más superficial el de mayor presencia de carbón (nivel I, 226.9 mg/kg).
- Pilonos 1. Este muestreo, de 52 cm de profundidad y 2 niveles edáficos, permitió una escasa recuperación de carbón, con una antracomasa total de 118.4 mg/kg (máximo en el nivel II, 104.8 mg/kg).
- Pilonos 2. Finalmente, el segundo muestreo llevado a cabo en el paraje de Pilonos presentó también bajas tasas de carbón, que totalizaron en el conjunto de los 3 niveles identificados (80 cm de profundidad) una antracomasa de 143 mg/kg, siendo el nivel superior (I) el más productivo (tasa de 87.1 mg/kg).

9.3.2 Identificación taxonómica de especies, géneros y familias

El número estándar de identificaciones por nivel de muestreo ha sido 50, si bien no en todas las catas el número de fragmentos de carbón recuperados ha alcanzado dicho valor en cada uno de los horizontes diferenciados. En cualquier caso, se ha analizado un total de 1131 muestras de carbón, de las que un 96.2 % han resultado identificaciones válidas (como especie, género, familia o distinción entre Angiosperma/Gimnosperma), y solo un 3.8 % de las muestras han quedado sin identificar (muestras indeterminadas).

En conjunto, y tal y como se recoge en la tabla 5, se han registrado fragmentos correspondientes a 14 géneros (*Abies*, *Acer*, *Cistus*, *Crataegus*, *Daphne*, *Erica*, *Fraxinus*, *Juniperus*, *Lonicera*, *Pinus*, *Quercus*, *Rosa*, *Salix* y *Taxus*) y otras 3 familias (labiadas, leguminosas y rosáceas), además de un porcentaje variable de fragmentos de los que solo se ha podido discernir su pertenencia a angiospermas o gimnospermas. En solo 2 de los 14 géneros encontrados se ha podido alcanzar el nivel de especie (*P. pinaster* y *T. baccata*). Respecto a la distribución de los taxones identificados entre árboles y especies arbustivas y/o de matorral, se han encontrado evidencias de 7 árboles (géneros *Abies*, *Acer*, *Fraxinus*, *Pinus*, *Quercus* –caduco y perenne– y *Taxus*), mientras que la presencia de leñosas integrantes de las orlas preforestales o de sustitución de los bosques ha supuesto un total de 8 géneros arbustivos y/o de matorral (*Cistus*, *Crataegus*, *Daphne*, *Erica*, *Juniperus*, *Lonicera*, *Rosa* y *Salix*), además de las 3 familias antedichas. En cualquier caso, *Quercus* sp. es el taxón que está presente en un mayor número de muestreos (en todos) y también es el que tiene como promedio un mayor peso porcentual (obviando en este caso el grupo de angiospermas sin identificar). Por el contrario, hay una serie de taxones cuya importancia relativa en la cohorte de identificaciones es muy escasa, sin considerar en este caso su importancia ecológica, que

además solo han aparecido en uno o dos de los puntos muestreados, caso de los géneros *Abies*, *Erica*, *Fraxinus*, *Lonicera*, *Rosa*, *Salix* y *Taxus*.

En cuanto a fitodiversidad, los muestreos con mayores tasas de antracomasa presentan un mayor espectro de taxones identificados. Destacan en este sentido los muestreos de Fuenfría Alta, Navacillo 3, Cañada de Enmedio y Puerto de los Valientes, en los que están presentes respectivamente 14, 11, 11 y 10 especies, géneros o familias (incluyendo los grupos de angiospermas y gimnospermas sin identificar). En el caso de los muestreos de Cañada de Enmedio y Puerto de los Valientes, cabe destacar que han aparecido 5 de los 7 taxones arbóreos identificados para el conjunto de los puntos de muestreo (*Abies*, *Acer*, *Fraxinus*, *Quercus caduco* y *Quercus perenne* en el primer caso, y *Abies*, *Acer*, *Pinus*, *Quercus caduco* y *Taxus* en el segundo). En el otro extremo, los muestreos con menor tasa de carbón son los que, de manera inversa a los casos anteriores, tienen una menor fitodiversidad, destacando Navacillo 2 y Cañada del Cuerno, con solo 7 y 8 especies, géneros o familias presentes respectivamente en ellos.

Dado que las dataciones se han restringido a especies arbóreas, debido al mayor interés de estas a la hora de hacer una primera aproximación a la composición pretérita de los bosques de montaña del área de estudio, a continuación, se detalla su presencia en los diferentes muestreos considerados (véase también Tabla 5). En primer lugar, *Abies* sp. solo está presente en Fuenfría Alta, Cañada de Enmedio y Puerto de los Valientes, siendo testimonial en el primer enclave (1.2 % del total de identificaciones del muestreo), algo más importante en el segundo (6 %) y notable en el último (14 %). *Acer* sp. también está presente en Cañada de Enmedio, además de en Puerto de Lifa y Puerto de los Valientes, aunque con una significación en todos los casos relativamente escasa, representando en concreto un 2, 6.5 y 9.1 % respectivamente. *Fraxinus* sp. solo ha aparecido en Cañada de Enmedio (9.1 %), al igual que *T. baccata* en Puerto de los Valientes (0.3 %) y *P. pinaster* en Fuenfría Alta (1.4 %). Más frecuente ha sido la aparición del género *Pinus* sp., cuyo carbón se ha recuperado en Fuenfría Alta, Navacillo 3 y Puerto de los Valientes, aunque con diferente significación en cada muestreo (15.8, 2.8 y 1.3 % respectivamente). Respecto a *Quercus* sp., es el género arbóreo más frecuente, pues además de aparecer en todos los puntos analizados, lo hace con relativa significación, siempre por encima del 8 % salvo en Cañada de Enmedio (3.3 %), destacando sobremanera en Fuenfría Alta (43.2 %), Navacillo 2 (25.7 %), Navacillo 3 (25 %) y Puerto de los Valientes (23.9 %). La separación entre *Quercus* sp. *caduco* y *Quercus* sp. *perenne*, cuando ha sido posible, ha ofrecido resultados relativamente similares, tanto en cuanto a la presencia de ambos grupos, que es escasa y limitada a no más de 4 y 3 muestreos respectivamente (Navacillo 1, Fuenfría Alta, Cañada de Enmedio y Puerto de los Valientes; y Navacillo 3, Fuenfría Alta y Cañada del Cuerno), como en lo referente a su representatividad relativa, que queda entre el 2 y el 8.6 %; tan solo, como excepción, en el caso de Cañada del Cuerno, la significación porcentual de *Quercus* sp. *perenne* es destacada, con un 36.2 %.

Tabla 5. Número de identificaciones y representatividad de los taxones (en %) en cada muestreo (en negrita aparecen resaltados los taxones arbóreos). Localidades: 1. Navacillo 1; 2. Navacillo 2; 3. Navacillo 3; 4. Puerto de Lifa; 5. Fuenfría Alta; 6. Cañada de Enmedio; 7. Cañada del Cuerno; 8. Puerto de los Valientes; 9. Pilonos 1; 10. Pilonos 2.

Localidades	Número de identificaciones por punto de muestreo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nº de identificaciones	52	101	216	51	200	150	39	200	59	63
Taxones	Representatividad (%) de los taxones identificados en cada muestreo									
Abies sp.	0	0	0	0	1.2	14	0	6	0	0
Acer sp.	0	0	0	2	0	6,5	0	9.1	0	0
<i>Cistus sp.</i>	17.3	3	4.6	0	0	0	0	0	5.1	6.3
<i>Crataegus sp.</i>	0	0	0	12	0	0	2.6	0	22	11.1
<i>Daphne sp.</i>	1.9	2	3.2	4	0	0	25.6	0	3.4	9.5
<i>Erica sp.</i>	0	0	0	0	2.7	0	0	0	0	0
Fraxinus sp.	0	0	0	0	0	9.1	0	0	0	0
<i>Juniperus sp.</i>	3.8	2	0.5	0	4.9	10	10.3	29.5	8.5	1.5
Labiadas	3.8	1	7.4	4	5.9	0	25.6	5	1.7	7.9
Leguminosas	9.6	0	8.3	8	1.6	0	7.7	0	0	0
<i>Lonicera sp.</i>	0	0	0	4	1.8	0	0	0	0	0
Pinus sp.	0	0	2,8	0	15.8	0	0	1.3	0	0
Pinus pinaster	0	0	0	0	1.4	0	0	0	0	0
Quercus sp.	9.6	25.7	25	18	42.3	3.3	10.3	23.9	8.5	17.5
Quercus sp. (caduco)	3.8	0	0	0	2.6	3.9	0	8.6	0	0
Quercus sp. (perenne)	0	0	1.9	0	3.5	36.2	0	0	0	0
<i>Rosa sp.</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.3
Rosáceas	13.6	0	7.4	18	7.7	7.6	0	0	11.9	7.9
<i>Salix sp.</i>	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0	0
Sorbus sp.	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0
Taxus baccata	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0
Angiosperma	27	43.6	29.6	30	5.6	7.9	15.4	9.3	37.2	30.3
Gimnosperma	0	2	3.7	0	1.8	1	2.5	4.6	0	0
Indeterminado	9.6	20.7	5.6	0	0.4	0	0	1.7	1.7	1.6
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fuente: autoría propia.

Cabe destacar entre los matorrales la presencia de *Juniperus sp.* y del grupo de labiadas en un total de 9 muestreos, y el importante peso que algunos de los taxones leñosos no arbóreos han tenido en determinados enclaves (sin considerar los grupos diferenciados genéricamente como angiospermas y gimnospermas), como *Cistus sp.* en Navacillo 1 (17.3 %), *Daphne sp.* en Cañada del Cuerno (25.6 %), *Juniperus sp.* en Puerto de los Valientes (29.5 %), el grupo de labiadas en Cañada del Cuerno (25.6 %) y las rosáceas en Puerto de Lifa (18.4 %). Las

muestras indeterminadas, presentes en 7 de los 10 muestreos, solo han destacado en Navacillo 2 (20.7 %).

9.3.3 Dataciones radiocarbónicas

Se ha datado carbón de 5 de los 7 taxones arbóreos identificados: géneros *Abies*, *Acer*, *Fraxinus*, *Pinus* y *Quercus* de tipo caduco. En total, han sido 29 los fragmentos sometidos al tratamiento radiocarbónico, correspondientes a tres puntos de muestreo: Fuenfría Alta (7 muestras), Cañada de Enmedio (14) y Puerto de los Valientes (8) (Tabla 6 y Figura 17). De dichas dataciones, 10 han ofrecido cronologías milenarias (antigüedad superior a 1000 años), mientras que las restantes han sido más recientes, destacando numerosas muestras de edades subactuales (400 o menos años). El conjunto de estas dataciones cubre un lapso temporal de cerca de 10 000 años, siendo la muestra más antigua de 9974 años cal BP (cal: edad calibrada; BP: Before present), y la más reciente datada entre 1764 y 1939 (fecha calibrada).

El muestreo de Fuenfría Alta ofrece los resultados de mayor interés dadas sus dataciones milenarias, cubriendo el periodo 9974-1007 años cal BP. Tres de las dataciones han correspondido a fragmentos de *Abies* sp., con una cronología comprendida entre 9974 y 5677 años cal BP. De época más reciente han sido los dos fragmentos de *P. pinaster* datados, que se remontan a entre 4160 y 3803 años cal BP. Las dos restantes dataciones corresponden a *Quercus* sp. de tipo caduco, y en este caso son las más recientes del muestreo, con una cronología de entre 1590 y 1007 años cal BP.

En Cañada de Enmedio las cronologías obtenidas de las 14 muestras sometidas a datación radiocarbónica solo han abarcado un intervalo temporal inferior a 1000 años, siendo muchas de las muestras de carácter subactual (con una antigüedad de hasta 400 años aproximadamente). Se ha datado un total de 9 muestras de *Abies* sp., dado el interés que presenta analizar la presencia antigua de abetales en el enclave, pero en todos los casos han ofrecido cronologías recientes, fechadas entre finales del siglo XVII y principios del siglo XX. Las restantes dataciones sí han ofrecido información más relevante, aunque sin exceder los 1000 años de antigüedad. Se ha obtenido la cronología de una muestra de *Fraxinus* sp., con una antigüedad de 857–756 años cal BP, de dos muestras de *Acer* sp., ofreciendo unas edades de 998 a 568 años cal BP, y, finalmente, de otros dos fragmentos de *Quercus* sp. de tipo caduco, resultando edades comprendidas entre 979 y 760 años cal BP.

Finalmente, las 8 muestras datadas en Puerto de los Valientes se corresponden con un lapso temporal de unos 4000 años (4483 a 379 años cal BP), con una muestra subactual fechada entre el siglo XVII y el XVIII. En concreto, se han analizado cuatro fragmentos de *Abies* sp., de los cuales solo uno ha ofrecido una cronología milenaria (1345-1040 años cal BP), mientras que los restantes han presentado una antigüedad de entre 570 y 379 años cal BP. Se han datado además sendas muestras de *Acer* sp. y *Pinus* sp.; en el primer caso se ha obtenido un resultado subactual que fecha el fragmento entre 1602 y 1791, mientras que en el segundo

caso se ha obtenido la cronología más antigua del muestreo, que se remonta a 4483-4228 años cal BP. Por último, se han datado otras dos muestras de *Quercus* sp. de tipo caduco, con cronologías que se remontan a hace entre 1124 y 621 años cal BP.

Tabla 6. Resultado de las dataciones radiocarbónicas de las muestras seleccionadas. Para las muestras subactuales, inferiores a 400 años, la edad calibrada corresponde a la fecha.

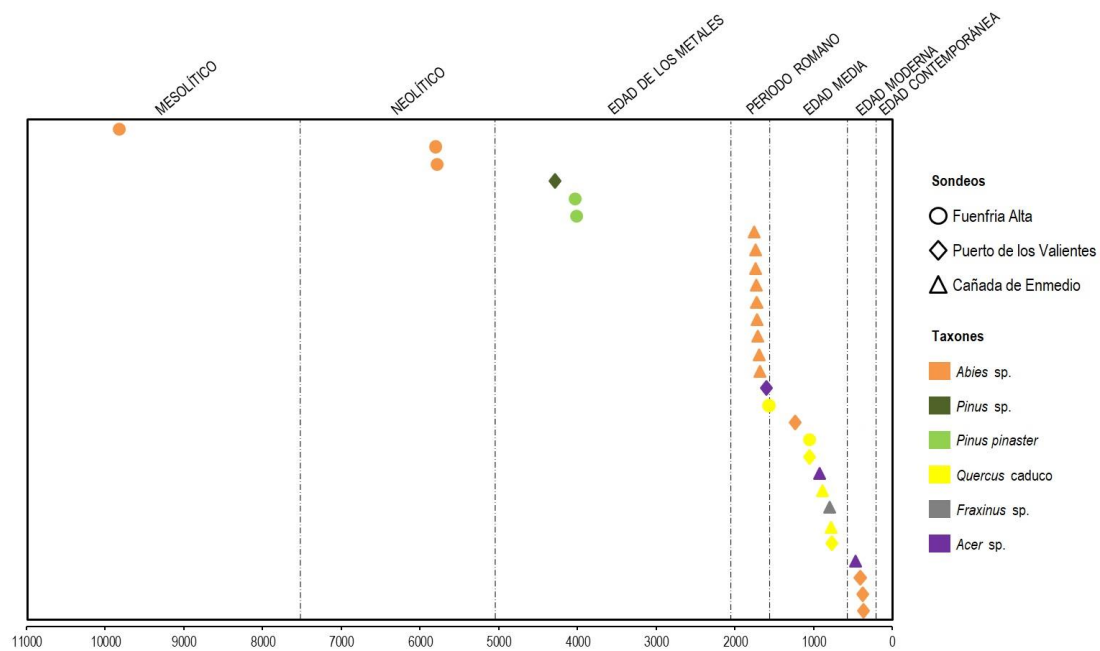
Localidad	Taxón	Nivel de muestreo	Edad absoluta (Before Present, BP)	Edad calibrada (fecha o años cal BP)	Referencia laboratorio	Rango de cronologías (n=número de muestras datadas)
Fuenfría Alta	<i>Abies</i> sp.	I	5015 ± 35 BP	5963-5727 BP	Poz-113778	9974-1007 BP (n=7)
	<i>Abies</i> sp.	I	4970 ± 35 BP	5929-5677 BP	Poz-113779	
	<i>Abies</i> sp.	III	8740 ± 50 BP	9974-9626 BP	Poz-113780	
	<i>Pinus pinaster</i>	IV	3650 ± 40 BP	4160-3936 BP	Poz-113269	
	<i>Pinus pinaster</i>	III	3590 ± 35 BP	4130-3803 BP	Poz-113781	
	<i>Quercus</i> sp. caduco	I	1095 ± 30 BP	1130-1007 BP	Poz-113782	
	<i>Quercus</i> sp. caduco	III	1510 ± 30 BP	1590-1398 BP	Poz-113783	
Puerto de los Valientes	<i>Abies</i> sp.	IV	1197 ± 73 BP	1345-1040 BP	5160.1.1	4483-229 BP (n=8)
	<i>Abies</i> sp.	I	345 ± 30 BP	555-382 BP	Poz-113771	
	<i>Abies</i> sp.	IV	360 ± 30 BP	570-385 BP	Poz-113772	
	<i>Abies</i> sp.	I	335 ± 30 BP	549-379 BP	Poz-113773	
	<i>Acer</i> sp.	IV	265 ± 30 BP	1602-1791 (fecha)	Poz-113774	
	<i>Quercus</i> sp. caduco	II	630 ± 30 BP	733-621 BP	Poz-113268	
	<i>Quercus</i> sp. caduco	IV	1065 ± 30 BP	1124-997 BP	Poz-113776	
	<i>Pinus</i> sp.	IV	3860 ± 35 BP	4483-4228 BP	Poz-113775	
Cañada de Enmedio	<i>Abies</i> sp.	II	15 ± 30 BP	1725-1919 (fecha)	Poz-113784	998 BP- Presente (n=14)
	<i>Abies</i> sp.	II	125 ± 30 BP	1766-1903 (fecha)	Poz-113826	
	<i>Abies</i> sp.	II	170 ± 30 BP	1699-1916 (fecha)	Poz-113827	
	<i>Abies</i> sp.	III	200 ± 30 BP	1690-1926 (fecha)	Poz-113828	
	<i>Abies</i> sp.	I	50 ± 30 BP	1728-1919 (fecha)	Poz-113270	
	<i>Abies</i> sp.	I	180 ± 30 BP	1696-1917 (fecha)	Poz-113846	
	<i>Abies</i> sp.	I	80 ± 30 BP	1730-1926 (fecha)	Poz-113847	
	<i>Abies</i> sp.	II	180 ± 30 BP	1696-1917 (fecha)	Poz-113848	
	<i>Abies</i> sp.	II	115 ± 30 BP	1764-1939 (fecha)	Poz-113829	

	<i>Fraxinus</i> sp.	III	825 ± 30 BP	857-756 BP	Poz-113271
	<i>Acer</i> sp.	III	955 ± 30 BP	998-865 BP	Poz-113830
	<i>Acer</i> sp.	II	480 ± 30 BP	612-568 BP	Poz-113832
	<i>Quercus</i> sp. caduco	III	890 ± 30 BP	979-802 BP	Poz-113272
	<i>Quercus</i> sp. caduco	III	825 ± 25 BP	852-760 BP	Poz-113273

Fuente: autoría propia.

Figura 17. Dataciones radiocarbónicas.

EDADES Y PERIODOS



Fuente: autoría propia.

9.4. Discusión

4.1 Nueva información paleoecológica del Parque Natural Sierra de las Nieves

En el sur de España, y en las montañas béticas en particular, la información sobre la composición de los bosques de montaña en el pasado es notablemente deficiente, tal y como apuntan, por diversas causas, autores como López & López (1994) y Olmedo-Cobo et al. (2017, 2019a). Hasta la fecha, el estudio de los pólenes había sido la principal fuente de procedencia de prácticamente todas las investigaciones que analizan o se relacionan con esta cuestión; Carrión (2012) recoge buena parte de los análisis palinológicos efectuados, entre otros, en diferentes enclaves béticos, resultantes de muy diversos ambientes (turberas, cuevas, lagunas, yacimientos arqueológicos). En este contexto, solo unos pocos registros polínicos

como, por ejemplo, los derivados de las sucesivas prospecciones en las turberas de la laguna de Padul, en Sierra Nevada, aportan información detallada que permite conocer con relativa exactitud la composición florística y las formaciones vegetales dominantes en el extremo suroeste de Sierra Nevada y en la parte más oriental de la depresión de Granada en la fase final del Pleistoceno, ofreciendo así fundamentos para explicar el paisaje vegetal pretérito.

En el caso del Parque Natural Sierra de las Nieves, hay una práctica total ausencia de estudios paleoecológicos que indaguen en el pasado biogeográfico de este territorio. Este tipo de información resulta de gran valor a la hora de gestionar ecosistemas tan amenazados frente al cambio global como los abetales andaluces o los quejigales de montaña, y no solo por la posibilidad que ofrece de reconstruir los ambientes forestales del pasado, sino también porque permite estudiar en determinados casos la dinámica temporal de estos en distintas fases paleohistóricas, precisando la naturaleza de las principales perturbaciones (climáticas y/o antrópicas) acaecidas (Costa et al., 2005; Alcalde, 2006). Esta situación provoca, por ejemplo, que el conocimiento paleoecológico a lo largo de los últimos 10 000 años de una de las formaciones más amenazadas en este territorio, como son los abetales de *A. pinsapo*, considerados bosques climáticos relictos terciarios (Arista, 1995; Linares et al., 2011; AlbaSánchez & López-Sáez, 2013), haya sido una cuestión hasta hace muy poco aún por abordar. De hecho, más allá de los resultados de estudios polínicos regionales, que han permitido esa consideración paleoendémica consensuada por los científicos, solo en los últimos años –desde 2016– se han empezado a desvelar algunas de las claves que explican su estado y distribución actuales.

En primer lugar, la aplicación de la palinología en el espacio protegido se limita a la reciente aportación de Alba-Sánchez et al. (2019) a partir del sondeo efectuado en pastizales higrófilos en la Cañada de las Ánimas (1403 m s.n.m.), que permite conocer la evolución de *A. pinsapo* en este territorio y en su entorno en los últimos 1000 años aproximadamente. Unos resultados que apuntan a que los abetales, tras una fase inicial de gran estabilidad durante el período islámico, sufrieron una importante degradación en los inicios de la época cristiana (finales del siglo XV y principios del XVI), mientras que la Era Moderna (entre mediados del siglo XVI e inicios del siglo XIX) marcó el inicio de la gestión del bosque con ciclos de deforestación-conservación relacionados con el aprovechamiento del pinsapo para la industria naval. Finalmente, los últimos dos siglos parece que quedan definitivamente marcados por una progresiva reducción del abetal que desemboca en el momento actual, en el que la extensión del abetal como bosque en su área de distribución se limita a unas 1250 ha (Guzmán et al., 2012), considerando en este caso una parcial e incipiente recuperación forestal acaecida desde mediados del siglo XX.

En cuanto a los análisis pedoantracológicos se refiere, hay que considerar los llevados a cabo en determinados macizos béticos en los últimos años, siendo la aplicación de esta metodología algo también muy reciente –prácticamente inédito– para el conjunto de la Cordillera. En concreto, se ha prospectado en diferentes zonas de montaña de la Serranía de Ronda con el

objeto de profundizar en el conocimiento paleobiogeográfico de las principales especies forestales orófilas –entre otras– a lo largo del Holoceno (Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2020). Su implementación, como era de esperar, comienza a desvelar interesantes pautas paleoecológicas, hasta ahora desconocidas, del propio pinsapo o de otras coníferas, caso de *P. pinaster*. En el caso de los abetales, son varias las paleolocalidades que se han encontrado a partir del hallazgo de carbón de *Abies* sp. en enclaves en los que la especie no está presente en la actualidad. Todos ellos se sitúan en la periferia montañosa de la Sierra de las Nieves, como son la Sierra de la Palmitera (Gómez-Zotano et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2017) y la Sierra de Jarastepar (Pardo-Martínez et al., 2021, en prensa), a las que se suman los resultados que se presentan en este trabajo en el paraje de la Fuenfría Alta, que constituye una nueva paleolocalidad de Sierra Bermeja incluida en el Parque Natural Sierra de las Nieves. Respecto a *P. pinaster*, la aplicación de este método ha permitido comprobar el carácter autóctono de la especie sobre los suelos tóxicos desarrollados en las rocas ultramáficas de Sierra Bermeja (Olmedo-Cobo et al., 2019a); además, queda demostrada la existencia de una dinámica entre pinares resineros y abetales en dicho macizo determinante de cambios en el nivel altitudinal del ecotono entre ambas formaciones (Olmedo-Cobo et al., 2019b). Todo lo anterior ha permitido concluir que las coníferas espontáneas han tenido un papel ecológico principal en el territorio bermejense durante buena parte del Holoceno.

Junto a los abetales y pinares resineros, otra de las formaciones forestales orófilas de mayor singularidad presente en la Sierra de las Nieves por su excepcionalidad ecológica son los quejigales de montaña de *Q. alpestris*, cuyo hábitat restringido se limita a determinados enclaves elevados de las altas montañas calizas subbéticas occidentales (además de en la Sierra de las Nieves, en la Sierra de Tolox). Se trata de bosques en clara regresión, catalogados en peligro de extinción, ya que sus poblaciones presentan un 90 % de individuos adultos y senescentes, y una escasa supervivencia de plántulas, a lo que hay que añadir el hecho de que su hábitat está fuertemente alterado por procesos erosivos y sometido a una gran presión ganadera (Bañares et al., 2011). De esta especie, hasta la fecha no se tenía información veraz de carácter paleoendémico en este territorio, por lo que los resultados de las dataciones que se presentan en esta investigación a partir del análisis de los carbones del suelo constituyen la primera aportación en este sentido, lo cual sin duda deber ser aprovechado para implementar las posibilidades de esta metodología de cara a conseguir una gestión adaptativa del quejigo de montaña frente a las amenazas presentes y futuras que comprometen su conservación.

Respecto a la antracomasa encontrada, y a pesar de que el fuego se considera como uno de los principales factores modeladores del paisaje vegetal en el Mediterráneo (Mouillot et al., 2003; Bond & Keeley, 2005; Ajbilou et al., 2006; Gil-Romera et al., 2008; Tinner et al., 2016), las cantidades de carbón encontradas en los muestreos llevados a cabo en el Parque Natural son, en general, escasas –en algunos casos, se podrían considerar ínfimas–. De hecho, el valor máximo de antracomasa por nivel de muestreo que se ha encontrado ha sido de 473.8 mg/kg en el nivel III de Cañada de Enmedio, siendo este muestreo el que ha entregado una

tasa total más elevada, ligeramente superior a 1000 mg/kg en el conjunto de los 3 horizontes identificados (45 cm). Mención aparte merecen las tasas de carbón encontradas en las catas de Navacillo 1 y 2, Puerto de Lifa y Cañada del Cuerno, todos ellos por debajo de 50 mg/kg, valor que se puede considerar extremadamente bajo.

En este sentido, los valores obtenidos son, en general, netamente inferiores a los encontrados en otros enclaves cercanos, en particular si se comparan con Sierra Bermeja, donde se han alcanzado antracomasas localmente superiores a 100 000 mg/kg por muestreo en Sierra Palmitera (Gómez-Zotano et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2017), o con Los Reales de Sierra Bermeja, con valores superiores a 2000 mg/kg por muestreo (Olmedo-Cobo et al., 2019a). En ambos casos, se trata de enclaves con predominio de suelos serpentínicos desarrollados sobre peridotitas. Por el contrario, en otros análisis efectuados sobre suelos desarrollados en calizas subbéticas de la Serranía de Ronda, la cantidad de carbón que ha sido posible recuperar mediante esta metodología de trabajo ha sido, de manera general, más bien pequeña, tal y como atestiguan, además de los resultados que aquí se presentan, las catas efectuadas en las sierras de Jarastepar, del Pinar y de los Pinos (Pardo-Martínez et al., 2021, en prensa), en los que los valores máximos de antracomasas por muestreo no superaron los 200 mg/kg. Parece, por tanto, que, más allá de la aleatoriedad inevitable en el hallazgo de fragmentos de carbón en los enclaves analizados, los suelos carbonatados asociados a las calizas subbéticas, especialmente aquellos tipo terra rossa, tienen escasa capacidad para retener y/o conservar el carbón, en particular en áreas con pendientes acusadas (Pardo-Martínez et al., 2021, en prensa), lo que también parece que se ha detectado en la Cordillera Cantábrica (Beato-Bergua et al., 2019).

Las bajas tasas de antracomasas en los enclaves sondeados también podría apuntar a la existencia de otros factores con un papel tan o más decisivo que el fuego en la configuración pretérita del paisaje vegetal en los enclaves más elevados de la Sierra de las Nieves como, por ejemplo, la ganadería abusiva o las talas incontroladas (Bauer, 2003; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2020; Vargas, 2020). Asimismo, la localización de algunos de los puntos de muestreo en enclaves cimeros o en su entorno inmediato también permite pensar que dichos puntos han sido menos afectados históricamente por el fuego que otros sectores de medianías y basales, al margen de que se trate de episodios naturales o de incendios con origen antrópico, estos últimos tradicionalmente asociados al carboneo doméstico o industrial (Gómez-Zotano, 2006; Vargas, 2020).

9.4.2 Primeros datos acerca de la dinámica y composición florística de los bosques holocenos en el Parque Natural Sierra de las Nieves

A pesar de la relativa escasez de carbón encontrado en general, la información obtenida de las dataciones efectuadas permite un inicial conocimiento acerca de la composición florística de los bosques de la Sierra de las Nieves en determinados momentos del Holoceno. El muestreo de Fuenfría Alta es el que ofrece una información más trascendente por el hallazgo de fragmentos

de *Abies* sp. (intensidad de la señal del 1.2 %), con una antigüedad de entre 9974 y 5727 años cal BP (3 dataciones), lo que permite identificar este lugar como una antigua localidad de *A. pinsapo* en la Serranía de Ronda dada la ausencia de la especie en la actualidad. Una nueva paleolocalidad de abetal que se suma a las recientemente dadas a conocer por Gómez-Zotano et al. (2017) y Olmedo-Cobo et al. (2017, 2019ab) en la Sierra de la Palmitera y Pardo-Martínez et al. (2021, en prensa) en la Sierra de Jarastepar, y que supone encontrar la conectividad pretérita entre los pinsapares extintos de Sierra Bermeja y los que aún se conservan en la Sierra de las Nieves (Gómez-Zotano et al., 2020). Conviene aclarar que, aunque la identificación de las muestras de *Abies* no permite alcanzar el nivel de especie, estas podrían corresponder al abeto andaluz dada su actual área de distribución.

Junto a las evidencias de *Abies*, la presencia segura de *P. pinaster* (1.4 %) hace unos 4000 años (2 dataciones) permite suponer, considerando lo establecido por Olmedo-Cobo et al. (2019ab) para la limítrofe Sierra Bermeja, que el pinar resinero pudo expandirse desde esta hasta colonizar determinadas secciones perimetrales del actual dominio del abetal. Ello apuntaría, tal y como señalan estos autores para el macizo bermejense, a la posibilidad de que la desaparición del abetal en Fuenfría Alta se produjese hace entre 5000 y 4000 años coincidiendo con una fase climática más seca y cálida a partir de hace unos 4500-4000 años en el Mediterráneo Occidental (Jalut et al., 2000); la alternancia entre pulsos de aridez y fases húmedas y frías es un hecho comprobado a lo largo del Holoceno medio e inicial en la región Mediterránea, tal y como demuestran los análisis polínicos y los niveles lacustres, que además evidencian un rápido desarrollo del clima mediterráneo en los últimos milenios (Cheddadi et al., 1998; Jalut et al., 2000). Es evidente, además, que el predominio de bosques de coníferas mejor adaptados a condiciones más secas, como los pinares resineros, y la facilidad de ignición de la especie, también pudo favorecer la expansión e intensidad de los incendios, contribuyendo aún más si cabe al retraimiento de los abetales en un periodo de creciente aridez tras la acusada fase húmeda del Óptimo Atlántico que tuvo lugar hace unos 8000-6000 años (Reed et al., 2001). En este sentido, Gómez-Zotano et al. (2017) y Olmedo-Cobo et al. (2017), a partir del análisis del carbón en la cercana Sierra de la Palmitera, señalan que algo similar pudo acontecer con anterioridad, hace unos 10 000-9000 años, lo que previsiblemente estaría relacionado con el máximo térmico –y seco hasta hace 9500 años– en el entorno del Mar de Alborán (Jalut et al., 2000; Cacho et al., 2001).

Por otra parte, la presencia *in situ* de *P. pinaster* demuestra, asimismo, que esta conífera es espontánea y ha crecido históricamente de manera natural dentro del espacio protegido, a pesar de que las formaciones arboladas actuales de esta especie son fruto de repoblaciones en la mayor parte de los casos.

La tercera especie que se ha datado pertenece a un taxón caduco sin identificar del género *Quercus* (señal de 2.6 %), y presenta una antigüedad de 1590-1007 años cal BP (2 dataciones). Bien es cierto que no es posible establecer si las muestras identificadas pertenecen a *Q. faginea/alpestris* dada la presencia de ambas especies en la Sierra de las

Nieves, o incluso a *Q. pyrenaica*, presente de manera relictiva y exclusiva en otros afloramientos de gneis en la periferia del macizo. En cualquier caso, la identificación de *Quercus* caduco permite asegurar la presencia relativamente reciente de caducifolios en este lugar, lo que no necesariamente significa el desarrollo de un bosque como tal. Además, cabe la posibilidad de la existencia en el pasado de un bosque mixto de quercíneas con coníferas (en principio *P. pinaster*). No es menos cierto que la fuerza de la señal de *Quercus* sp. (43 %) y la ausencia de dataciones de este grupo introduce notables incógnitas acerca de la posible configuración de bosques de planifolios (quejigares, encinares o robledales) en el pasado en esta localidad, y de la potencial configuración de formaciones arboladas mixtas *Pinus-Quercus*.

En cualquier caso, las particulares condiciones edáficas de este enclave, donde el suelo, profundo, adquiere un matiz ácido al formarse sobre gneis, pero también microclimáticas (ladera orientada a noroeste, pero a su vez afectada por los nublados de estancamiento asociados al levante), ofrecen un escenario favorable a los caducifolios, que pudieron prevalecer en épocas más húmedas sobre las coníferas. Más aún si se considera que, junto a la presencia de *Quercus* caduco, se han identificado algunos fragmentos de *Sorbus* –señal muy débil, del 0.9 %–, género que, al igual que el anterior, está ausente en la actualidad en la zona de muestreo. Además, la presencia actual de *Pteridium aquilinum* y del geófito *Narcissus bugei* demuestra que las condiciones ecológicas son propicias para el desarrollo de caducos en mayor medida que para las coníferas, lo cual permite suponer que también fue así en el pasado durante fases climáticas más húmedas. Finalmente, otros géneros que han formado parte de la orla florística acompañante o de sustitución de los bosques en este enclave en el pasado, sin que en este caso se pueda argumentar nada acerca de su presencia cronológica más allá de su comprobada ausencia en la actualidad, son *Lonicera* (1.8 %), *Erica* (2.7 %) y *Juniperus* (4.9 %), junto a otros taxones no identificados pertenecientes a las familias de las rosáceas (7.7 %), labiadas (5.9 %) y leguminosas (1.6 %).

Considerando la inexistencia de otros bioindicadores, y de acuerdo con Pérez-Latorre et al. (2000) y Gómez-Zotano (2006), se puede establecer que la vegetación potencial actual corresponde a la serie de los robledales rondeños mesomediterráneos silicícolas, *Luzulo baeticae-Quercetum pyrenaicae*, formaciones de roble melojo monoespecíficas restringidas a zonas de ladera y cumbre por encima de 800 metros de altitud en el piso mesomediterráneo húmedo a hiperhúmedo. Este hecho reforzaría en este caso la probabilidad de que, al menos, algunos de los fragmentos identificados como *Quercus* caduco proviniesen de antiguos robledales asentados en Fuenfría Alta hace entre 1000 y 1500 años. En este sentido, la cohorte florística que integra la orla de los actuales robledales está compuesta por especies, entre otras, como *Arbutus unedo*, *Erica arborea* o *Rubus ulmifolius*, que encajan perfectamente en los taxones identificados mediante el análisis de los carbones (ericáceas las dos primeras y rosácea la tercera).

Por tanto, es asumible que el paraje de la Fuenfría Alta haya actuado en distintos momentos del Holoceno a modo de ecotono entre los pinares resineros-abetales, presentes en la Sierra

de la Palmitera durante buena parte de los últimos 10 000 años (Olmedo-Cobo et al., 2019ab), y los bosques caducos de *Quercus* (probablemente robledales), cuya dominancia se habría producido en función de la alternancia entre ciclos húmedos y secos, y fríos y cálidos.

Del muestreo del Puerto de los Valientes se han datado 8 fragmentos de carbón, 4 de los cuales pertenecen a *Abies* sp. (señal del 6 %), habiéndose obtenido cronologías que demuestran su presencia en este enclave en época reciente y subactual (hace entre 1300 y 380 años). Dicho periodo se considera dentro de una fase climática que se caracteriza por una tendencia inicial a una creciente aridez (Jalut et al., 2000), con una posterior recuperación que da paso al denominado Óptimo Climático Medieval entre 950 y 1250, que en España resultó cálido y húmedo, aunque con altibajos (Font-Tullot, 1988); al mismo siguió un nuevo periodo frío y en general seco, correspondiente a la Pequeña Edad del Hielo, que en la Península se acusó fundamentalmente entre los siglos XVI y XVIII (Alberola, 2014). Considerando lo anterior, y que en este enclave hoy día solo se encuentran pies aislados de *Abies*, concentrándose el abetal en cañadas inferiores más húmedas y resguardadas, se puede inferir que siglos atrás la densidad del arbolado fue mayor, en particular al principio del periodo y durante la fase más húmeda medieval. Por tanto, es posible que en el pasado predominasen en determinados momentos bosques de mediana densidad o bien matorrales orófilos arbolados en grado variable en este tipo de enclaves cimeros y netamente más expuestos que las laderas inferiores. La edad de las muestras más recientes, que se remonta a hace unos 570-380 años, permite argumentar además un aumento en la recurrencia de los incendios forestales con la conquista castellana de Al-Ándalus, lo que concuerda con las conclusiones que se pueden extraer del único análisis polínico de referencia (Alba-Sánchez et al., 2018), que refleja que los siglos de transición entre la época medieval y el Renacimiento fueron los que supusieron un mayor retroceso general de los bosques de la Sierra de las Nieves. Asimismo, el supuesto endurecimiento de las condiciones ambientales durante la Pequeña Edad del Hielo también pudo provocar una mayor presión sobre el medio que, de ser así, habría contribuido igualmente a la merma creciente de los abetales en este enclave.

Del mismo modo hay que entender la cronología obtenida de la muestra de *Acer* sp. sometida a datación (señal del género 9.1 %), con una antigüedad fechada entre 1602 y 1791. Este taxón, al igual que el pinsapo y otros encontrados en el registro de carbón, de los que no se ha podido efectuar dataciones a pesar de su interés, como por ejemplo *T. baccata* (0.3 %), se halla presente de manera dispersa y relictual en el entorno de la localidad. Es decir, se podría entender que, dentro de la antedicha mayor densidad que pudo tener el arbolado con anterioridad al Medieval y al Renacimiento, en este caso también los arces pudieron tener más relevancia en el paisaje vegetal pretérito (presumiblemente igual que tejos, serbales...), siendo muy castigados en los últimos siglos dentro del proceso general de deforestación al que se vio sometido el macizo.

Respecto a las dataciones efectuadas de *Quercus* sp. caduco (2 fragmentos), han entregado una antigüedad de entre 1124 y 621 años cal BP. Se trata de muestras que en principio hay

que asignar a *Q. alpestris* ya que, más allá de las condiciones desfavorables para encinas o coscojas reinantes en este enclave presumiblemente desde miles de años, lo añosos que son la mayoría de los ejemplares que se conservan en la actualidad en este entorno apuntan a bosques muy antiguos cuyo esplendor pasado seguramente fue mucho mayor. Por tanto, es posible afirmar sin duda que el quejigal de montaña ha estado presente aquí durante, al menos, los últimos 1000 años, y seguramente con una importancia superior al abetal durante esta fase final del Holoceno dada la significación de la señal del grupo *Quercus* sp. (23.9 %) (que cabe asignar al grupo de los caducos debido a la ausencia en el registro de carbón de *Quercus* perenne, tal y como sucede en el actual paisaje vegetal).

Considerando las presencias analizadas anteriormente, *Abies*, *Acer* y *Quercus* caduco, y sus cronologías, parece verosímil la posible existencia en el pasado de franjas de bosque mixto de quejigal-abetal con otros caducos en la transición entre la franja forestal superior y la cumbre del Torrecilla, florestas hoy día prácticamente irreconocibles debido a la alteración a la que se han visto sometidos sus hábitats.

Por último, aunque no menos importante, el hallazgo de un fragmento de carbón de *Pinus* sp. (señal de 1.3 %) permite plantear la hipótesis de la posible presencia de otra conífera de montaña –además del pinsapo– como integrante de orla vegetal forestal de este enclave en el pasado. En este caso, aunque no ha sido posible alcanzar la identificación del fragmento como especie, dadas las condiciones ecológicas del lugar la probabilidad de que dicho taxón pertenezca al grupo *nigra/sylvestris* es más elevada que la consideración de otros taxones (por ejemplo, *P. pinaster* o *P. halepensis*). Estos posibles pinares de montaña conformarían una clímax vegetal de manera conjunta con los sabinares rastreros, presentes en la actualidad en este sector de la Sierra de las Nieves a partir de unos 1700 m s. n. m., aunque únicamente arbolados con abetos dispersos. Esta hipótesis supondría que el dominio actual de sabinar rastrero en los sectores más elevados de la Sierra de las Nieves (esencialmente en el Pico Torrecilla) pudo presentar en el pasado como acompañantes coníferas dispersas del género *Pinus* y no solo *Abies*. Así lo apunta la presencia actual de taxones de óptimo oromediterráneo, como *Daphne oleoides* o *J. hemisphaerica*, bioindicadores potenciales de los pinares supra-oromediterráneos béticos (formaciones de *P. nigra* y *sylvestris*). Es decir, de este hallazgo se infiere que el límite forestal de este sector cacuminal de la Sierra de las Nieves pudo estar integrado por un cinturón de *Pinus*, tal y como sucede en otros macizos subbéticos, como es el caso de Sierra Mágina, en cuyo tercio superior –a partir de 1700 m s. n. m.– aparecen localmente pinares residuales de *P. nigra*, en un entorno donde domina el sabinar rastrero con o sin pino salgareño; o la presencia relicta de *P. nigra* en macizos prelitorales de la Cordillera, como en la Sierra de Almijara, en las mismas condiciones altitudinales que las de Puerto de los Valientes, lo que añade mayor verosimilitud a la anterior hipótesis. Por no citar los pinares de montaña de las más continentales y frías sierras de Baza, Castril, Cazorla y Segura. Además, la importante señal de *Juniperus* sp. encontrada en el registro de carbón en este muestreo (29.5 %) asegura una importancia notable del dominio del sabinar rastrero de montaña en el pasado. En este caso, por cuestiones edáficas, es lógico pensar en la dominancia pretérita de

J. sabina frente a *J. hemisphaerica*, tal y como sucede en el presente, siendo muy poco probable la aparición siglos o milenios atrás de *J. oxycedrus* o *J. phoenicea* a estas altitudes. Por tanto, parece plausible pensar que este lugar ha sido en el pasado un ecotono entre distintas teselas de bosque en su extensión fínicola altitudinal, que habrían dejado paso a formaciones rastreras de *Juniperus*, en las que la densidad del arbolado y el tipo predominante dependería de factores mesológicos locales (suelo, orientación, afección antrópica, capacidad de regeneración de la vegetación post-incendio...) y de los altibajos climáticos desarrollados a lo largo del Holoceno.

Finalmente, del muestreo de Cañada de Enmedio se han datado 14 fragmentos, sin que ninguno de ellos haya presentado una antigüedad mayor a 1000 años. De hecho, las 9 muestras de *Abies* sp. seleccionadas han resultado subactuales (en torno a 300 años o menos) –con una señal del género del 14 %–, lo que atestigua la importancia que el fuego ha tenido en esta localidad en época reciente y permite valorar en su justa medida el abetal maduro existente aquí. En efecto, en esta localidad se conserva un abetal con árboles muy añosos –aunque la cohorte de edades es muy diversa y existe una notable regeneración del pinsapo con plántulas y arbolillos jóvenes–, que seguramente sean coetáneos de los ejemplares hasta ahora más antiguos identificados en la Sierra de las Nieves, con más de 300 años en el caso de la Cañada del Cuerno (Génova, 2013). Por ello, se puede atribuir a este bosque húmedo de coníferas un papel de nicho ecológico que ha podido amortiguar la intensidad de los incendios forestales, contribuyendo a su propia conservación tanto frente al propio fuego como en relación a unas condiciones climáticas recientes desfavorables para la regeneración de *A. pinsapo* tras el paso de las llamas (López, 2013) y, por tanto, benévolas para la intrusión de otras especies forestales.

La presencia actual de otros taxones acordes a las referidas condiciones de bosque húmedo, como *Q. faginea*, *Acer* sp. y *Fraxinus* sp., aconsejó la selección de varias muestras de carbón de estos géneros para su datación con el objeto de comprobar su importancia pretérita en el abetal. En este caso, las cronologías, correspondientes a dos fragmentos de *Acer* (señal de 6.5 %), a otras dos dataciones de *Quercus* caduco (3.9 %) y a una muestra de *Fraxinus* (9.1 %), tienen una antigüedad de entre 1000 y 500 años. Por un lado, solo el hecho de haber encontrado fragmentos de dichos taxones ya apunta, dada su escasísima significación actual, a una mayor presencia en el pasado de estos caducifolios en el seno del abetal. Precisamente, este hecho de nuevo hay que relacionarlo con la intensidad en la deforestación que sufrió el macizo durante la etapa final del Medioevo y el Renacimiento (Alba-Sánchez et al., 2018). Además, y aunque no se dispone de dataciones, la notable presencia de *Quercus* sp. perenne en este muestreo –señal del 36.2 %– indicaría que la encina probablemente estuvo presente en este lugar en siglos pasados; aunque es difícil establecer su importancia relativa respecto al abetal, es presumible asumir el desarrollo de encinares (o, al menos, bosques mixtos de abetos y encinas) durante las fases más secas del Holoceno final y, dentro de estas, en particular a raíz de incendios que mermasen la importancia del abetal con caducos.

Por último, la presencia de rosáceas en el registro del carbón (señal de 7.6 %) concuerda con varias de las especies caduco-espinosas arbustivas que son acompañantes comunes del abetal en el punto de muestreo, como por ejemplo *C. monogyna*. Del resto de taxones presentes en la actualidad en el lugar de muestreo no se ha encontrado señal alguna y sí de otros ausentes hoy día, como *Juniperus* sp. (10 %). En este caso, esta presencia se puede interpretar como una respuesta de la vegetación en el pasado a condiciones más frías y/o secas considerando las especies que, dentro de este género, es plausible que acompañasen a abetales, quejigales o encinares pretéritos en este lugar (*J. sabina*, *J. phoenicea* o *J. oxycedrus*). Considerando la modesta altitud del enclave, los sabinares morunos o los enebrales comunes pudieron tener un protagonismo en el pasado difícilmente otorgable a los sabinares rastreros, en particular en aquellos momentos en los que –como antes se apuntaba– los encinares pudieron tener un protagonismo notable.

9.4.3 La Sierra de las Nieves frente al cambio global: importancia de los resultados para la gestión de especies y comunidades amenazadas

Los resultados obtenidos apuntan a que el territorio del Parque Natural Sierra de las Nieves comparte las dinámicas ambientales que en los últimos miles de años han afectado a la Cuenca Mediterránea. En efecto, la localización de la Sierra de las Nieves en la Cordillera Bética, y de ésta en el extremo occidental del Mediterráneo, ha determinado que sus bosques hayan experimentado drásticos cambios a lo largo de su historia: desde la extinción de las formaciones tropicales y lauroides tras la “mediterraneización” del clima y la crisis de aridez Messiniense, hasta la “alpinización” de las sierras más elevadas, la “atlantización” de las costas occidentales y la creación de refugios cálidos litorales a raíz de las sucesivas glaciaciones cuaternarias (Blanca et al., 1999; Médail & Diadema, 2009). El retroceso definitivo de los hielos, hace unos 12 000 años, la drástica subida de las temperaturas que se produjo y, en muchos casos, la desecación ambiental, permitieron la conformación definitiva del macrobioclima Mediterráneo, lo que indujo a condiciones más favorables para la vegetación de tipo esclerófilo. Este proceso permitió, a su vez, que las zonas más elevadas, donde se conservaban condiciones más frías y húmedas que las de su entorno, se convirtieran en refugios biogeográficos y de flora. En el caso de la Bética, al igual que en otras cordilleras perimediterráneas meridionales, como el Rif o el Atlas, es la altitud el factor que proporcionaría un microambiente idóneo para albergar determinados bosques orófilos cuya distribución pretérita fue más extensa (Arroyo et al., 2004; Hampe & Jump, 2011; Abel-Schaad et al., 2014, 2018; Cheddadi et al., 2017). De este modo, tras el Tardiglacial, y a lo largo del Holoceno, los paisajes de alta montaña han experimentado importantes transformaciones en un contexto de cambio global permanente, donde la variabilidad climática, los procesos paleoecológicos y la creciente actividad humana han jugado un papel definitorio en los últimos 15 000 años (Cunill et al., 2012). En el caso de la Sierra de las Nieves, los procesos de índole antrópica, sobre todo desde la Edad Media, centrados en la agricultura, la ganadería, la construcción naval y la

siderurgia (Bauer, 2003; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2020), han tenido como resultado una neta regresión de los bosques.

Aceptado es, en el escenario presente de cambio global, que la región Mediterránea se considera uno de los territorios que ya está experimentado plenamente nuevas y desconocidas dinámicas de origen antropogénico (Giorgi, 2006). Dentro de esta, serán los macizos montañosos de su parte occidental los que se espera que sufran una mayor disminución de la humedad en las próximas décadas (Nogués-Bravo et al., 2008); en este sentido, la comprobada tendencia hacia condiciones climáticas más cálidas y secas previstas para el conjunto del territorio ibérico (Giralt et al., 2017), así como las proyecciones futuras (Amblar et al., 2017), comprometen la viabilidad de abetales y quejigales en la Sierra de las Nieves, en particular considerando que estos bosques ya están presentando síntomas de declive, mermas en su crecimiento y reducciones en su área potencial de distribución (Linares et al., 2009; Gutiérrez-Hernández, 2018). Además, serán los sectores orófilos en los que se refugian estas formaciones los que se estima que se verán más afectados en términos de pérdida de biodiversidad debido a la imposibilidad de migración en altitud para las especies que ahí se desarrollan (Quézel & Médail, 2003; Huber et al., 2006; Cheddadi et al., 2017).

Por tanto, la Sierra de las Nieves, en función de sus características micro y mesoclimáticas, diferentes a las del resto del área circundante, ha resultado ser un territorio estratégico desde el punto de vista biogeográfico para la conservación de determinadas especies supervivientes de los eventos post-glaciación. Es decir, se puede considerar que el macizo presenta las características propias de un refugio de flora, que en parte suponen facilitar la supervivencia de este tipo de biotas bajo escenarios climáticos cambiantes desde centurias a milenios (Keppel et al., 2012). Ante el peligro de que este rol pueda desaparecer en un futuro cercano, considerando el escenario actual de crisis climática, su identificación como tal es esencial para analizar su potencial función para salvaguardar la diversidad biológica (Hannah et al., 2014). La Sierra de las Nieves formaría parte de esta manera de un conjunto de refugios pequeños presentes en toda la Serranía de Ronda en particular y en la cuenca del Mediterráneo en general (Petit et al., 2003; Médail & Diadema, 2009). Estos enclaves son denominados refugios crípticos del sur, y son particularmente importantes durante los períodos de clima cálido para especies que no toleran las altas temperaturas, caso de *A. pinsapo* o *Q. alpestris*.

Este papel de la Sierra de las Nieves como refugio de flora a lo largo del Holoceno queda demostrado con los resultados que se presentan en esta investigación a partir del análisis pedoantracológico, en particular para determinadas especies, como el pinsapo y el quejigo de montaña, pero también para otras como tejos, arces, fresnos, serbales y pinos de montaña, cuya sutil presencia en el registro de carbón apunta a una significación mayor en el pasado tras los altibajos climáticos que sucedieron al Tardiglaciario. Del mismo modo, parece evidente que la tendencia en los últimos milenios ha sido hacia una progresiva merma de la significación espacial de los bosques que ocupan el tercio superior del macizo, caso particular de abetales y quejigales, tanto por cuestiones antrópicas como por el paulatino calentamiento del clima.

La información colectada puede ser implementada para el desarrollo de experiencias de gestión adaptativa con el objeto de planificar la conservación de los taxones en peligro que integran los antedichos bosques amenazados, lo cual debe emanar ineludiblemente de la colaboración estrecha entre gestores y científicos (Herrero & Zavala, 2015). Esto es particularmente trascendente para la conservación de los abetales de *A. pinsapo*, dado que forman parte del grupo de coníferas mediterráneas de montaña para las cuales los modelos predicen reducciones de su área actual de distribución de hasta el 90 % considerando los escenarios más pesimistas para 2080 (Benito-Garzón et al., 2008). Asimismo, los resultados aquí presentados deben ser empleados como una valiosa herramienta para desarrollar una estrategia adecuada para la protección/regeneración de las condiciones ecológicas de los hábitats que soportan los bosques de montaña analizados. Igualmente, el diseño de un plan de recuperación de aquellas especies que, tras los datos paleoecológicos obtenidos, se considere viable su reforestación debe ser tenido en consideración, habida cuenta que en éste y en otros macizos cercanos, con similar problemática, caso de Sierra Bermeja, las distintas acciones de restauración y regeneración de los ecosistemas más amenazados han estado basadas hasta la fecha en fuentes históricas, estudios de los hábitats actuales y modelizaciones de distribución de especies no exentos de imprecisiones e incertidumbres (Gómez-Zotano et al., 2020). Con todas estas potenciales medidas de gestión adaptativa se lograría, además, la mejora de la conectividad entre estos bosques de montaña de distribución disyunta en la zona occidental de la Bética, en particular de los abetales, para los que se ha comprobado recientemente que, si bien sus poblaciones presentan valores relativamente altos de diversidad genética, la distancia genética entre estas es escasa (Cobo-Simón et al., 2020), lo que indicaría que las masas boscosas actuales proceden de un bosque más o menos continuo existente a principios del Holoceno.

9.5. Conclusiones

El análisis pedoantracológico se ha mostrado en los últimos años como una herramienta de gran utilidad para conocer algunas pautas paleoecológicas de especie arbóreas orófilas, en muchos casos constituyentes del límite superior del bosque, en montañas mediterráneas y alpinas de Europa. Así queda demostrado en esta aproximación inicial al conocimiento de la dinámica y flora holocena de los bosques de montaña de la Sierra de las Nieves para *Abies pinsapo*, *Quercus alpestris* y, en menor medida, *Pinus pinaster*. Entre los principales resultados, destaca el hallazgo de la primera paleolocalidad de abetal en el Parque Natural, así como de pinar resinero (ambas en las inmediaciones del paraje Fuenfría Alta). Igualmente, sobresale la constatación de la antigüedad en el tercio superior del macizo de los bosques relictos en peligro de extinción de *Q. alpestris* a partir de la información colectada en el enclave Puerto de los Valientes. Muy destacado también ha sido el hallazgo de carbón de *Pinus* sp. en este enclave, lo que, unido a la intensidad de la señal referente a los sabinares rastreros, permite suponer que en el pasado pudo existir un cinturón arbolado en mayor o menor grado integrado por una conífera arbórea diferente a *A. pinsapo*. Por otra parte, la información

colectada en su conjunto apunta a una posible extensión más amplia de los bosques en el pasado y a una mayor significación en su composición de algunas especies hoy muy puntuales, como serbales, arces, tejos y fresnos. Se evidencia asimismo la aparición/desaparición de determinadas formaciones arbóreas en función de ciclos climáticos húmedos o secos y fríos o cálidos, caso, por ejemplo, de las formaciones de *Quercus* en Fuenfría Alta o Cañada de Enmedio. Lo anterior, además, hay que ponerlo en relación con la huella antrópica de las actividades humanas en el macizo, muy intensa en los últimos milenios y que, sin duda, es un factor principal a tener en cuenta, junto a los ciclos naturales, para entender el actual paisaje vegetal de la Sierra de las Nieves.

La implementación de esta información de corte paleoecológico en la gestión conservacionista de los hábitats más amenazados del espacio protegido ofrece respuestas certeras a las incógnitas que inevitablemente acompañan al análisis de fuentes documentales históricas, a los estudios de los hábitats actuales y a las modelizaciones teóricas, pilares hasta la fecha de las actuaciones para favorecer la regeneración y expansión natural de estos amenazados bosques orófilos, relictos y endémicos. La presencia puntual de fragmentos de carbón de gran interés por su situación anómala en relación con la vegetación actual –caso del hallazgo de carbón de *Pinus* sp. en el muestreo del Puerto de los Valientes– aconseja profundizar aún más en el conocimiento pedoantracológico de la Sierra de las Nieves como línea de trabajo futura. De nuevo, el conocimiento de nuevas pautas paleoecológicas de abetales y quejigales, así como el descubrimiento de poblaciones extintas de estos u otros bosques, deber ser una cuestión prioritaria como fórmula para la comprensión de las dinámicas ambientales de las que deriva el actual paisaje vegetal, cuyo entendimiento es vital para prever las consecuencias ecológicas derivadas del cambio global en estos frágiles ecosistemas de frontera y poder así trabajar en su preservación futura.

Referencias

- Abel-Schaad, D., Pulido, F., López-Sáez, J.A., Alba-Sánchez, F., Nieto, D. et al. (2014). Persistence of tree relicts in the Spanish Central System through the Holocene. *Lazaroa*, 35, 107–131. https://doi.org/10.5209/rev_LAZA.2014.v35.41932
- Abel-Schaad, D., Iriarte, E., López-Sáez, J.A., Pérez-Díaz, S., Sabariego, S. et al. (2018). Are *Cedrus atlantica* forests in the Rif Mountains of Morocco heading towards local extinction? *The Holocene*, 28(6), 1023–1037. <https://doi.org/10.1177/0959683617752842>
- Ajbilou, R., Marañón, T. & Arroyo, J. (2006). Ecological and biogeographical analyses of Mediterranean forests of northern Morocco. *Acta Oecologica*, 29(1), 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2005.08.006>
- Alba-Sánchez, F. & López-Sáez, J.A. (2013). Paleobiogeografía del pinsapo en la Península Ibérica durante el Cuaternario. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía*:

- Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 33–52). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Alba-Sánchez, F., Abel-Schaad, D., López-Sáez, J.A., Sabariego Ruiz, S., Pérez-Díaz, S. et al. (2018). Paleobiogeografía de *Abies* spp. y *Cedrus atlantica* en el Mediterráneo occidental (península ibérica y Marruecos). *Ecosistemas*, 27(1), 26–37. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1441>
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Abel-Schaad, D., Sabariego, S., Pérez-Díaz, S. et al. (2019). The impact of climate and land-use changes on the most southerly fir forests (*Abies pinsapo*) in Europe. *The Holocene*, 29(7), 1176–1188. <https://doi.org/10.1177/0959683619838>
- Alberola, A. (2014). *Los cambios climáticos. La Pequeña Edad del Hielo en España*. Cátedra.
- Alcalde, C., García-Amorena, I., García-Álvarez, S., García-Calvo, D., García-García, R. et al. (2006). Contribución de la paleofitogeografía a la interpretación del paisaje vegetal ibérico. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 15(1), 40–54.
- Ali, A.A., Carcaillet, C., Talon, B., Roiron, P. & Terral, J.F. (2005). *Pinus cembra* L., a common tree in the inner French Alps since the early Holocene and above the present tree line: a synthesis based on charcoal data from soils and travertines. *Journal of Biogeography*, 32, 1659–1669. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01308.x>
- Amblar, M.P., Casado, M.J., Pastor, M.A., Ramos, P. & Rodríguez, E. (2017). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCCAR5*. AEMET.
- Arista, M. (1995). The structure and dynamics of an *Abies pinsapo* forest in southern Spain. *Forest Ecology and Management*, 74, 81–89. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03507-S](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03507-S)
- Arroyo, J.M., Carrión, J.S., Hampe, A. & Jordano, P. (2004). En Valladares, F. (Ed.), *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante* (pp. 29–67). Organismo Autónomo Parques Nacionales.
- Bañares, A., Blanca, G., Güemes, J., Moreno, J.C. & Ortiz, S. (2011). *Atlas y Libro Rojo de la Flora Vasculare Amenazada de España. Adenda 2010*. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal y Sociedad Española de Biología de la Conservación de Plantas.
- Batlloori, E., Blanco-Moreno, J.M., Ninot, J.M., Gutiérrez, E. & Carrillo, E. (2009). Vegetation patterns at the alpine treeline ecotone: The influence of tree cover on abrupt change in species composition of alpine communities. *Journal of Vegetation Science*, 20(5), 814–825. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01085.x>
- Bauer, E. (2003). *Los Montes de España en la historia*. Fundación Conde del Valle de Salazar.

- Beato-Bergua, S., Poblete-Piedrabuena, M.A. & Cunill-Artigas, R. (2019). *Taxus baccata* en la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 1–30. <https://doi.org/10.21138/bage.2772>
- Becker, A., Körner, C., Brun, J.J., Guisan, A. & Tappeiner, U. (2007). Ecological and land use studies along elevational gradients. *Mountain Research and Development*, 27(1), 58–65. <https://doi.org/10.1659/0276-4741>
- Benito-Garzón, M., Sánchez, R. & Sainz, H. (2008). Effects of climate on the distribution of Iberian tree species. *Applied Vegetation Science*, 11(2), 169–178. <https://doi.org/10.3170/2008-7-18348>
- Berthel, N., Schwörer, C. & Tinner, W. (2012). Impact of Holocene climate changes on alpine and treeline vegetation at Sanetsch Pass, Bernese Alps, Switzerland. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 174, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2011.12.007>
- Birks, H.H. & Bjune, A.E. (2010). Can we detect a west Norwegian tree line from modern samples of plant remains and pollen? *Vegetation History and Archaeobotany*, 19(4), 325–340. <https://doi.org/10.1007/s00334-010-0256-0>
- Blanca-López, G., Cabezudo, B., Hernández-Bermejo, J.E., Herrera-Maliani, C.M., Muñoz-Álvarez, J. (1999). *Libro Rojo de la flora silvestre amenazada de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- BOJA nº 233, de 3.12.2018. Junta de Andalucía.
- Bond, W.J. & Keeley, J.E. (2005). Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>
- Cabezudo, B., Talavera, S., Blanca-López, G., Salazar, C., Cueto, M. et al. (2005). *Lista roja de la flora vascular de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Cabezudo, B., Pérez-Latorre, A.V., Navas, P., Gil, Y. & Navas, D. (1998). *Parque Natural de la Sierra de las Nieves. Cartografía y evaluación de la flora y vegetación*. Universidad de Málaga.
- Cacho, I., Grimalt, J.O., Canals, M., Sbaiffi, L., Shackleton, N.J. et al. (2001). Variability of the western Mediterranean Sea surface temperature during the last 25,000 years and its connection with the Northern Hemisphere climatic changes. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 16(1), 40–52. <https://doi.org/10.1029/2000PA000502>
- Carcaillet, C. & Brun, J.J. (2000). Changes in landscape structure in the northwestern Alps over the last 7000 years: lessons from soil charcoal. *Journal of Vegetation Science*, 11, 705–714. <https://doi.org/10.2307/3236577>

- Carcaillet, C. & Thinon, M. (1996). Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary results. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 91, 399–416. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00060-7)
- Carrión, J.S. (2012). *Paleoflora y Paleovegetación de la Península Ibérica e Islas Baleares: Plioceno-Cuaternario*. Ministerio de Economía y Competitividad, Universidad de Murcia y Fundación Séneca.
- Casimiro-Soriguer, F., Pérez-Latorre, A.V. & Cabezudo, B. (2019). Novedades para la flora vascular del Espacio Natural Sierra de las Nieves (Málaga, España). *Acta Botanica Malacitana*, 44, 117–124. <https://doi.org/10.24310/abm.v44i0.6400>
- Cheddadi, R., Lamb, H., Guiot, J. & Van der Kaars, S. (1998). Holocene climatic change in Morocco: a quantitative reconstruction from pollen data. *Climate Dynamics*, 14, 883–890. <https://doi.org/10.1007/s003820050262>
- Cheddadi, R., Henrot, A., François, L., Boyer, F., Bush, M. et al. (2017). Microrefugia, climate change, and conservation of *Cedrus atlantica* in the Rif Mountains, Morocco. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5, 114. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00114>
- Choe, H., Thorne J.H. & Seo, C. (2016). Mapping national plant biodiversity patterns in South Korea with the MARS Species Distribution Model. *PLOS ONE*, 11(3), e0149511. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149511>
- Cobo-Simón, I., Méndez-Cea, B., Jump, A.S., Seco, J., Gallego, F.J. et al. (2020). Understanding genetic diversity of relict forests. Linking long-term isolation legacies and current habitat fragmentation in *Abies pinsapo* Boiss. *Forest Ecology and Management*, 461. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117947>
- Compostella, C., Trombino, L. & Caccianiga, M. (2013). Late Holocene soil evolution and treeline fluctuations in the Northern Apennines. *Quaternary International*, 289, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.02.011>
- Costa, M., Morla, C. & Sainz, H. (2005). *Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica*. Editorial Planeta.
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A. & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(4–5), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00334-011-0342-y>
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A., Rodríguez, J.M. et al. (2013). Holocene high-altitude vegetation dynamics in the Pyrenees: a pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach. *Quaternary International*, 289, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.04.041>

- Cunill, R., Métailié, J. & Galop, D. (2015). Palaeoecological study of Pyrenean lowland fir forests: Exploring mid-late Holocene history of *Abies alba* in Montbrun (Ariège, France). *Quaternary International*, 366, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.12.050>
- Davies, A.L. & Bunting, M.J. (2010). Applications of Palaeoecology in Conservation. *The Open Ecology Journal*, 3(2), 54–67. <https://doi.org/10.2174/1874213001003020054>
- Ejarque, A., Miras, Y., Riera, S., Palet, J.M. & Orengo, H.A. (2010). Testing micro-regional variability in the Holocene shaping of high mountain cultural landscapes: a palaeoenvironmental case-study in the eastern Pyrenees. *Journal of Archaeological Science*, 37, 1468–1479. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.007>
- Ferrarini, A., Alatalo, J.M. & Gustin, M. (2017). Climate change will seriously impact bird species dwelling above the treeline: A prospective study for the Italian Alps. *Science of The Total Environment*, 590-591, 686–694. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.027>
- Font-Tullos, I. (1988). *Historia del clima de España: cambios climáticos y sus causas*. INM.
- Galop, D. (1998). *La forêt, l'homme et le troupeau dans les Pyrénées. 6000 ans d'histoire de l'environnement entre Garonne et Méditerranée*. GEODE.
- García, E., Guindeo, A., Peraza, E. & de Palacios, P. (2003). *La madera y su anatomía*. MUNDIPRENSA.
- García, S., Bal, M., Allée, P., García-Amorena, I. & Rubiales, J.M. (2017). Holocene treeline history of a high-mountain landscape inferred from soil charcoal: The case of Sierra de Gredos (Iberian Central System, SW Europe). *Quaternary International*, 457(1), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.04.019>
- Génova, M. (2013). Dendroclimatología de *Abies pinsapo*. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 227–233). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Gil, A. (2002). *Simón de Rojas Clemente. Viaje a Andalucía. Historia Natural del Reino de Granada*. GBG Editora.
- Gil-Romera, G., García, M. & Calleja, J.A. (2008). The late Holocene palaeoecological sequence of Serranía de las Villuercas (southern Meseta, western Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*, 17(6), 653–666. <https://doi.org/10.1007/s00334-008-0146-x>
- Giorgi, F. (2006). Climate change Hot-Spots. *Geophysical Research Letters*, 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Giralt, S., Moreno, A., Cacho, I. & Valero-Garcés, B.L. (2017). A comprehensive overview of the last 2,000 years Iberian Peninsula climate history. *CLIVAR Exchanges*, 73, 5–10.

- Gómez-Zotano, J. (2006). *Naturaleza y paisaje en la Costa del Sol Occidental*. Servicio de Publicaciones Centro de Ediciones de la Diputación de Málaga.
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Martínez-Ibarra, E. (2017). Descubrimiento y caracterización geográfica de una depresión ultramáfica en Sierra Bermeja: nuevos datos geomorfoedáficos, fitogeográficos y paleoecológicos. *Pirineos*, 172, e026. <http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172001>
- Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal*. Editorial La Serranía.
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Cunill-Artigas, R. (2021). Análisis pedoantracológico y propuesta de conectividad ecológica de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. en la Red Natura 2000 de Sierra Bermeja. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 237–251). Editorial La Serranía.
- Guisan, A. & Zimmermann, N. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135, 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Gutiérrez-Hernández, O. (2018). Impacto del calentamiento global en la distribución y supervivencia del pinsapo (Serranía de Ronda). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 76, 504–549. <https://doi.org/10.21138/bage.2532>
- Guzmán, J.R., Catalina, M.A., Navarro-Cerrillo, R.F., López-Quintanilla, J. & Sánchez, R. (2013). Los paisajes del pinsapo a través del tiempo. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 111–158). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Hampe, A. & Jump, A.S. (2011). Climate relicts: past, present, future. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 313–333. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys102710-145015>
- Hannah, L., Flint, L., Syphard, A., Moritz, M., Buckley, L. et al. (2014). Fine-grain modeling of species' response to climate change: holdouts, stepping-stones, and microrefugia. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(7), 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.04.006>
- Hansen, A.J. & Di Castri, F. (1992). *Landscape boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows*. Springer.
- Harsch, M., Hulme, P., McGlone, M. & Duncan, R. (2009). Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*, 12-10, 1040–1049. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x>

- Herrero, A. & Zavala, M.A. (2015). *Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Holtmeier, F.K. & Broll, G. (2007). Treeline advance – driving processes and adverse factors. *Landscape Online*, 1, 1–33. <https://doi.org/10.3097/LO.200701>
- Huber, U., Bugmann, H. & Reasoner, M. (2006). *Global change and mountain regions: an overview of current knowledge*. Springer.
- Jacquot, C., Robin, A.M. & Bedeneau, M. (1973). Reconstitution d'un ancien peuplement forestier en forêt de Fontainebleau par l'étude anatomique de charbons de bois et leur datation par le 14C. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 120(5-6), 231–233. <https://doi.org/10.1080/00378941.1973.10839161>
- Jalut, G., Esteban, A., Bonnet, L., Gauquelin, T. & Fontugne, M. (2000). Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(3-4), 255–290. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00075-4)
- Keppel, G., Van Niel, K., Wardell-Johnson, G., Yates, C., Byrne, M. et al. (2012). Refugia: identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 21(4), 393–404. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00686.x>
- Kimball, K. & Weihrauch, D. (2000). Alpine Vegetation Communities and the Alpine-Treeline Ecotone Boundary in New England as Biomonitors for Climate Change. En McCool, S., Cole, D., Borrie, W. & Loughlin, J. (Eds.), *Wilderness science in a time of change conference* (pp. 93–101). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Kullman, L. (1998). Palaeoecological, biogeographical and palaeoclimatological implications of early Holocene immigration of *Larix sibirica* into the Scandes Mountains, Sweden. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 7(3), 181–188. <https://doi.org/10.2307/2997373>
- Llambí, L.D. (2015). Estructura, diversidad y dinámica de la vegetación en el ecotono bosquepáramo: revisión de la evidencia en la cordillera de Mérida. *Acta Biológica Colombiana*, 20(3), 5–20. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v20n3.46721>
- López-Quintanilla, J. (2013). *Los pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Universidad de Córdoba.
- López, P. & López, J.A. (1994). Comparison of peats and archaeological samples in the Andalusian region, Spain. En Davis, O. (Ed.), *Aspects of archaeological palynology: methodology and applications* (pp. 127–139). AASP Contributions Series.

- Linares, J.C. (2011). Biogeography and evolution of *Abies* (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: the roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 38(4), 619–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02458.x>
- Linares, J.C., Camarero, J.J. & Carreira, J.A. (2009). Interacting effects of changes in climate and forest cover on mortality and growth of the southernmost European fir forests. *Global Ecology and Biogeography*, 18(4), 485–497. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00465.x>
- Linares, J.C., Delgado-Huertas, A. & Carreira J.A. (2011). Climatic trends and different drought adaptive capacity and vulnerability in a mixed *Abies pinsapo*–*Pinus halepensis* forest. *Climatic Change*, 105, 67–90. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9878-6>
- McCune, J.L. (2016). Species distribution models predict rare species occurrences despite significant effects of landscape context. *Journal of Applied Ecology*, 53(6), 1871–1879. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12702>
- Médail, F. & Diadema, K. (2009). Glacial refugia influence plant diversity patterns in the Mediterranean Basin. *Journal of Biogeography*, 36(7), 1333–1345. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2008.02051.x>
- Médail, F. & Quézel, P. (1997). Hot-Spots analysis for conservation of plant biodiversity in the Mediterranean Basin. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 84, 112–127. <http://dx.doi.org/10.2307/2399957>
- Miller, J. (2010). Species Distribution Modeling. *Geography Compass*, 4(6), 490–509. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00351.x>
- Mouillot, F., Ratte, J.P., Joffre, R., Moreno, J.M. & Rambal, S. (2003). Some determinants of the spatio-temporal fire cycle in a Mediterranean landscape (Corsica, France). *Landscape Ecology*, 18(7), 665–674. <https://doi.org/10.1023/B:LAND.0000004182.22525.a9>
- Nicolussi, K., Kaufmann, M., Patzelt, G., van der Plicht, J. & Thurner, A. (2005). Holocene treeline variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. *Vegetation History and Archaeobotany*, 14, 221–234. <https://doi.org/10.1007/s00334-005-0013-y>
- Nogués-Bravo, D., Bastos, M., Lasanta, T. & López, J.I. (2008). Climate Change in Mediterranean Mountains during the 21st Century. *AMBIO*, 37(4), 280–285. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2008\)37\[280:CCIMMD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2008)37[280:CCIMMD]2.0.CO;2)
- OAPN - Organismo Autónomo Parques Nacionales (2018). *Propuesta de declaración del Parque Nacional de Sierra de las Nieves*. Ministerio para la Transición Ecológica.
- Olmedo-Cobo, J.A. & Gómez-Zotano, J. (2016). Los climas de la Serranía de Ronda: una propuesta de clasificación. *Takurunna*, 6-7, 23–58.

- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2017). Paleoecología de *Abies* sp. en Sierra Bermeja (sur de la península ibérica) durante el Holoceno medio a partir del análisis pedoantracológico. *Bosque*, 38(2), 259–270. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200004>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Gómez-Zotano, J. & Pardo-Martínez, R. (2019a). Aportaciones del análisis pedoantracológico al conocimiento paleoecológico de *Pinus pinaster* en el sur de España: el caso de Sierra Bermeja. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2667>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Gómez-Zotano, J. (2019b). The native status of *Pinus pinaster* on serpentine soils: charcoal analysis and palaeoenvironmental history in Sierra Bermeja (southern Iberian Peninsula, Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*, 28, 417–432. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0701-z>
- Pardo-Martínez, R. (2020). La pedoantracología en España: una revisión bibliográfica. *Pirineos*, 175, e059. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2020.175009>
- Pardo-Martínez, R., Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (en prensa). Paleobiogeographical reconstruction of *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. based on pedoanthracological analysis in the Serranía de Ronda (Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*.
- Pérez-Latorre, A.V., Navas, P., Gil, D. & Cabezudo, B. (1998). Datos sobre flora y vegetación de la Serranía de Ronda (Málaga, España). *Acta Botanica Malacitana*, 23, 149–191. <https://doi.org/10.24310/abm.v23i0.8557>
- Pérez-Latorre, A.V., Hidalgo-Triana, N. & Cabezudo, B. (2021). Biogeografía y bosques de la Serranía de Ronda (Cádiz-Málaga-Sevilla). En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp.11–58). Editorial La Serranía.
- Petit, R., Aguinagalde, I., de Beaulieu, J., Bittkau, C., Brewer S. et al. (2003). Glacial refugia: hotspots but not melting pots of genetic diversity. *Science*, 300(5625), 1563–1565. <https://doi.org/10.1126/science.1083264>
- Quézel, P. & Médail, F. (2003). *Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Elsevier.
- Reed, J.M., Stevenson, A.C. & Juggins, S. (2001). A multi-proxy record of Holocene climatic change in SW Spain: Laguna de Medina, Cádiz. *The Holocene*, 11(6), 707–719. <https://doi.org/10.1191/09596830195735>
- Reimer, P., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J., Blackwell, P. et al. (2013). IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1869–1887. https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947

- Rivas-Martínez, S. (2011). Memoria del Mapa de Vegetación Potencial de España. *Itinera Geobotanica*, 18, 5–800.
- Saltré, F., Saint-Amant, R., Gritti, E., Brewer, S., Gaucherel, C. et al. (2013). Climate or migration: what limited European beech post-glacial colonization? *Global Ecology and Biogeography*, 22(11), 1217–1227. <https://doi.org/10.1111/geb.12085>
- Schweingruber, F.H. (1990). *Microscopic wood anatomy: structural variability of stems and twigs in recent and subfossil woods from Central Europe*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
- Talon, B. (2010). Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in the French southern Alps: evidence from soil charcoal. *The Holocene*, 20(1), 35–44. <https://doi.org/10.1177/0959683609348842>
- Talon, B., Carcaillet, C. & Thinin, M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Geographie Physique et Quaternaire*, 52(2), 195–208. <https://doi.org/10.7202/004875ar>
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M., Sykes, M. & Colin, I. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(23), 8245–8250. <https://doi.org/10.1073/pnas.0409902102>
- Tinner, W. & Theurillat, J.P. (2003). Uppermost limit, extent, and fluctuations of the timberline and treeline ecocline in the Swiss Central Alps during the past 11,500 years. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 35, 158–169. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2003\)035\[0158:ULEAFO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2003)035[0158:ULEAFO]2.0.CO;2)
- Tinner, W., Vescovi, E., van Leeuwen, J., Colombaroli, D., Henne, P. et al. (2016). Holocene vegetation and fire history of the mountains of Northern Sicily (Italy). *Vegetation History and Archaeobotany*, 25(5), 499–519. <https://doi.org/10.1007/s00334-016-0569-8>
- Vargas, M.A. (2021). Los bosques de la Serranía de Ronda: la mirada ilustrada de un botánico decimonónico, Simón de Rojas Clemente Rubio. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 95–120). Editorial La Serranía.
- Vernet, J.L., Ogereau, P., Figueiral, I., Machado, C. & Uzquiano, P. (2001). *Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents, Sud-Ouest de l'Europe: France, Péninsule ibérique et Îles Canaries*. CNRS.
- Vescovi, E., Ammann, B., Ravazzi, C. & Tinner, W. (2010). A new Late-glacial and Holocene record of vegetation and fire history from Lago del Greppo, northern Apennines, Italy. *Vegetation History and Archaeobotany*, 19(3), 219–233. <https://doi.org/10.1007/s00334-010-0243-5>

Walsh, K., Richer, S. & de Beaulieu, J. (2006). Attitudes to altitude: changing meanings and perceptions within a 'marginal' Alpine landscape – the integration of palaeoecological and archaeological data in a high altitude landscape in the French Alps. *World Archaeology*, 38(2), 436–454. <https://doi.org/10.1080/00438240600813392>

10. THE HISTORY OF *ABIES PINSAPO* DURING THE HOLOCENE IN SOUTHERN SPAIN, BASED ON PEDOANTHROLOGICAL ANALYSIS

Abstract

The aim of this research is to reconstruct the ancient distribution area of *Abies pinsapo* Boiss. (Spanish fir) in the Serranía de Ronda region, southern Spain, during the Holocene. The main method was pedoanthracological analysis, the study of non-archaeological charcoal found in natural soils. In this research a total of 37 soil excavations were done in several mountain ranges with potentially favourable places for firs to have grown in the past. Specific sites and places such as hillsides, endorheic basins (with no outflow), sinkholes, summits and mountain passes were selected on the basis of evidence from a range of different sources including ancient documents, pollen studies and species distribution models. The soil samples collected from these sites were prepared in the laboratory and the charcoal was identified and radiocarbon dated. Statistical and cartographic analyses were also done. The study revealed evidence of past populations of *Abies* sp. in places where it is no longer found today. A total of 47 different chronologies were obtained from these sites with ages ranging between 9931 cal BP and 78 cal BP. In addition, the wide variations in the charcoal values enabled us to make an initial estimate of the importance of ancient forest fires in different places in the Serranía de Ronda. When this information has been considered with all the other available data sources, it will be an essential resource for the efficient management of relict fir woods in southern Spain.

Keywords: palaeoecology; soil charcoal; *Abies*; distribution area; Holocene; Iberian Peninsula.

Resumen

El objetivo de esta investigación es reconstruir el área de distribución pretérita de *Abies pinsapo* Boiss. en la Serranía de Ronda, sur de España, durante el Holoceno. El método principal de trabajo fue el análisis pedoantracológico, fundamentado en el estudio del carbón no arqueológico encontrado en suelos naturales. En esta investigación se han realizado 37 muestreos localizados varios enclaves montañosos. Estas localizaciones coinciden con lugares potencialmente favorables para haber albergado pinsapares en el pasado. Se han seleccionado lugares específicos, como laderas, cuencas endorreicas, sumideros, cumbres y puertos de montaña, basándose en información procedente de diversas fuentes, como documentos históricos, estudios polínicos y modelos de distribución de especies. Las muestras de suelo recogidas en campo se prepararon en el laboratorio y el carbón vegetal se identificó y se dató por radiocarbono. También se han realizado análisis estadísticos y cartográficos. El estudio reveló evidencias de antiguas poblaciones de *Abies* sp. en lugares donde hoy ya no se encuentra presente. Se han obtenido un total de 47 cronologías diferentes con edades comprendidas entre 9931 años cal BP y 78 años cal BP. Además, las importantes diferencias en los valores de antracomasa detectados han permitido hacer una primera estimación de la importancia histórica de los incendios forestales en diferentes lugares de la Serranía de Ronda.

Esta información, contextualizada con aquella procedente del resto de fuentes disponibles, puede constituir un recurso esencial para la gestión adaptativa de los abetales relictos del sur de España.

Palabras clave: paleoecología; carbón del suelo; *Abies*; área de distribución; Holoceno; península ibérica.

10.1. Introduction

Understanding how and why biological organisms are distributed in space is a central principle of biogeographical research (Miller, 2010), and the analysis of relations between taxa and their environment is a priority issue in any ecological discipline (Guisan & Zimmermann, 2000). Precise information about the distribution of existing taxa is therefore fundamental when it comes to assessing regional biodiversity. However, in many cases the existing data are insufficient (Choe et al., 2016) and as a result the real state of many endangered plants is far from certain because the locations and the state of conservation of all the existing populations are unknown (McCune, 2016). One example is *Abies pinsapo* Boiss. (Spanish fir), one of the most unusual tree species in Spain, with enormous ecological value, and the only strictly Mediterranean fir that grows naturally in our study area (Linares et al., 2010ab). From a palaeobiogeographical point of view, the most widely accepted theories state that it originated in a common ancestor that formed extensive fir forests in the western Mediterranean during the Cenozoic, as is demonstrated by fossil evidence (Linares, 2011). Its wide extension across southern Europe during the Pleistocene was greatly influenced by the recurrent oscillations in the climate, which caused continuous advances and retreats of the glaciers, which then led to the contraction and fragmentation of the distribution areas of the taxa which were best adapted to temperate climates (van der Veken et al., 2007; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013). For much of this period, the north and centre of the Iberian Peninsula was covered by ice and snow, but this did not prevent the massive expansion of firs and other mountain conifers in forests south of the ice line that occupied a large part of the mountain ranges in the south of the peninsula and also in the highest, coldest and wettest peaks in north Africa. When the last glacial period came to an end about 15 000 years ago and temperatures began to rise, these isolated *Abies* forests began to move to higher and damper mountain areas such as the Serranía de Ronda in southern Spain (Taberlet & Cheddadi, 2002; Carrión et al., 2003).

Today *A. pinsapo* is only found in Andalucía as an endemic in the Rondeño, western, part of the Cordillera Bética mountain chain, in the Serranía de Ronda and more specifically in the Sierra de las Nieves and Sierra Bermeja mountains in the province of Málaga, and in the Sierra del Pinar and the Sierra del Endrinal in the province of Cádiz (Navarro-Cerrillo et al., 2006a). These limestone-peridotite areas in medium to high mountains (1000-2000 m a.s.l.) retain similar ecological characteristics to those which existed during the Würm glacial period lower down in the southernmost part of the Iberian Peninsula, which has enabled them to become biogeographical refuge areas for *A. pinsapo*. This has facilitated its survival there to the present

day, while ensuring its genetic isolation and independent evolution from other European and North African firs in the Mediterranean basin (Jaramillo-Correa et al., 2010; Alba-Sánchez et al., 2018).

The classification of *A. pinsapo* as an endangered relict species that is especially vulnerable to any alterations in its habitat has led to a great deal of academic interest in recent decades as to its current situation and future prospects. The result is that its conservation has been well covered in a range of different scientific fields. Various studies have been published by the Junta de Andalucía (regional government) (Junta de Andalucía, 1996–1999, 2003, 2008, 2012, 2013) and there have also been a number of recent scientific publications (Liétor, 2002; Gómez-Zotano, 2004; Navarro-Cerrillo et al., 2006b; Soto, 2006; Linares et al., 2009, 2010ab, 2011ab, 2013; de Vita et al., 2010; Esteban et al., 2010; Sánchez-Robles et al., 2012; Blanes et al., 2013; López-Tirado & Hidalgo, 2014; Navarro-Cerrillo et al., 2014). All of these have studied this species today or in the recent past (since the 18th century), and have mainly concentrated on subjects such as the conservation, restoration and regeneration of the *Abies* woods, the protection of its habitats and the fight against the real threats to which it is exposed today.

As regards this last issue, the main risk factors threatening *A. pinsapo* today are forest fires, the isolation of the populations and their monostructural characteristics, the alteration of its habitats due to erosion and loss of soil, diseases associated with fungi and insects, and to a lesser extent hybridization and atmospheric pollution (López-Quintanilla, 2013). These factors have slowed the recovery of this fir since the mid 20th century, once human pressure on its ecological niches from tree felling, charcoal making and overgrazing had subsided. There are even some localities from which *A. pinsapo* has disappeared as a result of catastrophes such as deliberately started fires or clearance by tree felling; Gómez-Zotano (2004) and Soto (2006) identified examples of this kind in various mountain ranges, the Sierras de Alcaparaín, Palmitera, Real, de las Apretaderas in the province of Málaga and Sierra de los Pinos in Cádiz. In addition, in the mountains where *A. pinsapo* survives today, there were other areas of firs there in the past which were lost for the same reasons and have never recovered.

The Junta de Andalucía (regional government) has carried out various management programmes and projects to encourage the conservation, recovery and sustainability of the Spanish fir (2003, 2008, 2013) within the framework of the Estrategia Andaluza de Gestión Integrada de la Biodiversidad (Andalusian strategy for the integrated management of biodiversity). According to data from the second plan for the recovery of the Spanish fir, there are a total of 8146 ha where *A. pinsapo* is present in varying degrees (about 1250 ha can be considered as relatively mature, well-conserved woodland, about 3000 are woods of *Quercus ilex* (holm oak) or *Pinus* (pine) or scrub with scattered patches of *A. pinsapo* and about 4000 ha are woods with isolated firs. In addition, there are a further 709 ha from which *A. pinsapo* had disappeared and are currently being restored by replanting, or will be in the future. These projects date from several periods from as far back as 1957 (1959–67, 1968–1972, 1973–1983, 1986, 1988, 2001, 2004, 2005). These efforts to restore and regenerate the *A. pinsapo* woods

have been based on historic sources, studies of current habitats and species distribution models (SDMs), many of which have contained inaccuracies and uncertainties.

In order to remedy this lack of accurate information, in this paper we propose that past fires, the main reason for the disappearance of *A. pinsapo*, also offer a great opportunity to carry out a precise palaeobiogeographical reconstruction of its former natural habitat, which could be a key as set for its future recovery. With this in mind, the methodological basis of the research is the analysis of the past extent of *A. pinsapo* in the Serranía de Ronda using pedoanthracology. This technique involves the search, identification and dating of the charcoal found in natural soils (not in archaeological sites), the data from which are then subjected to statistical, palaeoecological and cartographic analyses.

The initial hypothesis is that the distribution area of *A. pinsapo* was much larger in the past than it is today and the results obtained in this study have confirmed this. The palaeobiogeographical information obtained will enable new measures to be introduced to further the conservation and management of this species.

10.2. Methods

10.2.1. Study area

The investigation was carried out in the Serranía de Ronda, a mountainous natural area located at the southwest end of the Cordilleras Béticas, southern Spain (Figure 18). The Serranía is bordered by the depressions of the Guadalquivir and Antequera rivers to the north, the valle de Guadalhorce to the east, the Mediterranean coast and the Strait of Gibraltar to the south and the much fatter countryside of the Campiña de Cádiz to the west. It extends over parts of the provinces of Málaga, Cádiz and Sevilla (36.5°–36.8°N; 5.5°–5°W).

The Serranía de Ronda is made up of large mountain spurs with a complex geology which converge in a high central plateau composed of detritic materials (small fragments of sedimentary rocks) with a basin, the Depresión de Ronda, which acts as the main axis linking the different parts of the Serranía (Mauthe, 1971). The plateau is surrounded by a succession of calcareous mountain ranges of which the highest peak is Torrecilla (1919 m a.s.l.) in the Sierra de Tolox (part of the larger range, the Sierra de las Nieves). From west to east this dolomitic limestone basin is encircled by the following mountains: Sierra de Grazalema (peak, Pinar, 1648 m), Endrinal (Reloj, 1535 m), Líbar (Palo, 1400 m), Jarastepar (1427 m), Prieta (1518 m) and Alcaparaín (Valdivia, 1292 m). Parallel to the coast are the southernmost, mountains, the peridotite Sierra Bermeja (Abanto, 1512 m) and Sierra Alpujata (Castillejos, 1073 m), and the marble Sierra Blanca (Lastonar, 1275 m) and Sierra de Mijas (1150 m). Other mountains worthy of note on the perimeter of the Serranía de Ronda include Sierra del Aljibe (1091 m), a sandstone massif at the southwestern end of the Serranía, and the limestone Sierras de Algodonales (Líjar, 1051 m) and Sierra de Tablón (Terril, 1128 m) at the northern end.

community (serie supra-mesomediterránea rondeña calcícola de *A. pinsapo*), and *Burio Macucae-Abieteto pinsapi* series (serie meso-supramediterránea bermejense serpentínicola de *A. pinsapo*) (Pérez Latorre et al., 1998).

According to research by Gómez-Zotano & OlmedoCobo (2020), this area has been subjected to a long process of human activity with many good and bad decisions affecting the woodland management, and it has suffered not only from traditional human activities in mountain areas, such as tree felling, burning and charcoal making, subsistence agriculture, conversion to grazing land, livestock farming or the selection of dominant trees, but also from the exceptional demand for timber by the Spanish navy, and from the early attempts at industrialisation in Júzcar and Marbella. Wood was also required for building the Ronda to Algeciras railway, and large swathes of woodland were lost in a proliferation of large forest fires from the second half of the 20th century onwards. These numerous negative effects have been countered in recent years by an increasing level of protection and more effective management and organization of this valuable shared woodland heritage.

Human beings have therefore played a fundamental role in the past and present distribution of wooded, cleared and re-wooded areas in the Serranía, in this way giving rise to the large areas of woodland that currently enrich the extensive ecological and cultural heritage of this area.

For all these reasons, the unusual geographical and historical framework of the Serranía de Ronda makes it an interesting experimental area for the identification of changes to the woodland in space and through time, and for exploring the problems arising from conservation and management policies.

10.2.2. Methodology

The main research method used in our study of *A. pinsapo* was pedoanthracological (soil charcoal) analysis, and in particular the method proposed by Carcaillet & Thinon (1996) and Talon et al. (1998), and later adapted by Cunill (2010) and Cunill et al. (2013). This consists of the following stages:

Fieldwork. A total of 37 soil pits were dug at the 25 sampling sites (Figure 18, ESM), which enabled us to cover a large part of the mountainous area in the study area. The sites were strategically distributed across the whole of the Serranía de Ronda, in places chosen because they may have acted as ecological niches for *A. pinsapo* during the Holocene according to the various sources of information available, species distribution models (SDMs), pollen studies and historical accounts. A sampling pit was dug at each site down to bedrock level, from which soil samples of between 3 kg and 15 kg per sampling level were taken. Phytosociological samplings of the local flora and plant communities were made for each of the sites.

Anthracological (charcoal) analysis. The second stage of our work took place in the laboratory and involved the following phases:

- The samples were wet sieved with mesh sizes of 0.8 mm, 2 mm and 5 mm. The soil fraction of the samples was gradually broken down, using water and a paintbrush, and poured through the sieve, leaving behind stones and possible charcoal fragments. The material collected by each of the three sieve sizes was left to dry in a space prepared for this purpose in the laboratory.
- The charcoal fragments were sorted from the sieved material and identified using a stereo microscope and the residual mineral fraction was then discarded. Before being discarded, all stone fragments of >5 mm were weighed for subsequent inclusion in the calculation of the amount of charcoal (anthracomass).
- Anthracomass analysis. This analysis compares the weight of the charcoal found in the soil (in mg) with the weight of the whole soil sample (in kg), as the absolute anthracomass (in mg/kg), having also calculated the specific anthracomass of *Abies* sp. for the samples in which it was found. For this calculation, the weight of the stony material trapped in the 5 mm mesh was subtracted from the initial weight of the soil sample.
- Taxonomic identification of the selected charcoals was done using a Nikon SMZ445 stereo zoom microscope and reflected light optical microscopy using an Olympus BX51 at 10–200x. The taxa represented by the charcoal fragments were identified by consulting various atlases of comparative anatomy of wood (Jacquot et al., 1973; Schweingruber, 1990; Vernet et al., 2001), and also by comparing them with the collection of carbonized Wood fragments stored in the anthracothèque at the laboratory of Physical Geography Department of Granada University. The maximum number of pieces of charcoal in each sample varied between 50 and 100 fragments and a total of 5649 pieces of charcoal were identified.
- Radiocarbon dating of 47 charcoal fragments of *Abies* sp. was done by the Poznań radiocarbon laboratory (Poznań, Poland) and Alfred-Wegener-Institut (Bremerhaven, Germany) and calibrated with Oxcal v. 4.4 (Oxcal, 2021) using the IntCal20 database (Reimer et al., 2020), to 2 sigma (95 % probability).
- Interpretation of the anthracological data.

10.3. Results

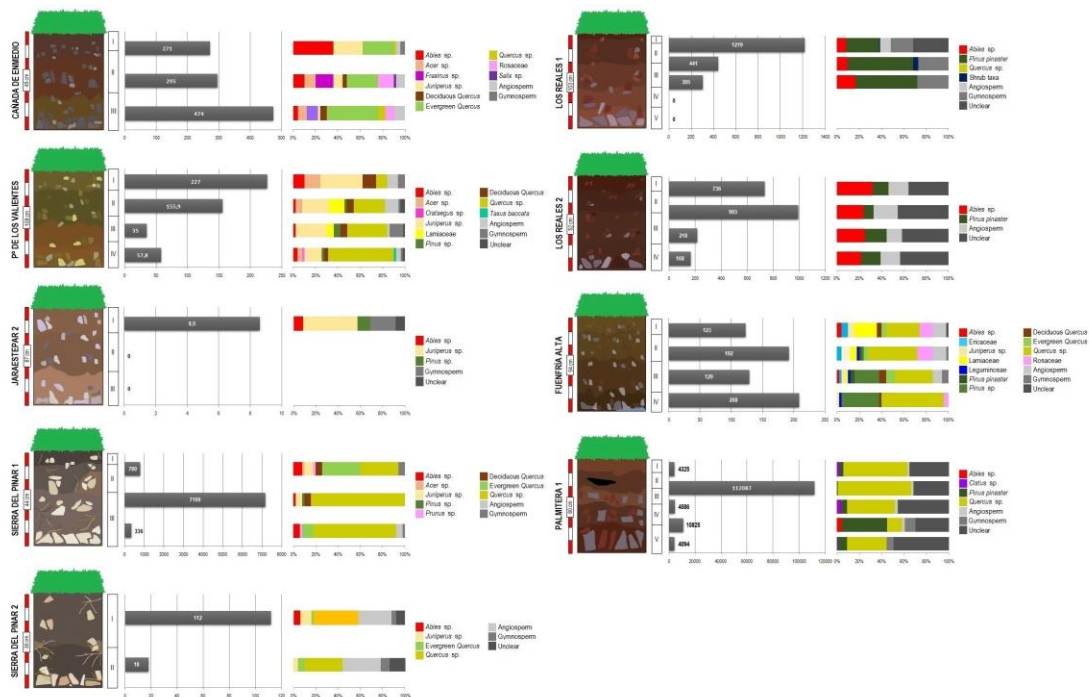
10.3.1. Taxon identification and anthracomass values

5649 charcoal fragments were analysed during the course of this research. However, in a large number of these we were only able to distinguish between angiosperms and gymnosperms, 12.1 % and 5 % of the total, respectively. In a further 24.2 % of the samples it was impossible to make an identification of any kind, due to either the deformation of the charcoal fragments, or the fact that the anatomical characteristics of the wood were practically invisible as a result of

the carbonisation process, the actions of fungi and/ or vitrification processes (glassy appearance of some charcoals). It is important to note that large amounts of vitrified charcoal were discovered in some of the samples studied. It has should clarified that charcoal vitrification is a process that has yet to be fully explained by the scientific community (Vaschalde et al., 2011), makes it impossible to carry out any kind of taxonomic identification. This means that certain taxa may be over- or underestimated, which would result in incomplete palaeoecological interpretations.

From a general perspective, the taxa most frequently found from the Serranía de Ronda sites as a whole are *Quercus* sp. (23.2 %) and *Pinus pinaster* (14.2 %). We also identified, albeit in much smaller percentages, genera such as *Pinus* (2.5 %) or families such as Lamiaceae (2.5 %), Fabaceae (2.3 %) and Rosaceae (1.3 %). Other categories were also detected, and between families, genera and species a total of 28 taxa were identified. The percentages of each of the remaining categories were practically negligible, ranging from between 1 % and 0.04 %. In most cases these identifications coincide with taxa currently present at the sampling sites. However, our analysis of the charcoal fragments also revealed various taxa that are not present today at some of the sampling sites. These new taxa include *Fraxinus* and *Salix* at Cañada de Enmedio, *Pinus* in the Sierra del Pinar in an area currently dominated by *A. pinsapo* and *Pinus* and *Abies* at Jarastepar 2.

Figure 19. Percentages of charcoal taxa identified, by sampling levels, from each of the sites where *Abies* sp was identified.



Source: own elaboration.

Using the pedoanthracological analysis procedure described above, we managed to identify 194 charcoal fragments belonging to *Abies* sp., 3.4 % of the total, from nine of the 25 sites: Los Reales 1 and 2, Puerto de los Valientes, Cañada de Enmedio, Sierra del Pinar 1 and 2, Palmitera 1, Jarastepar 2 and Fuenfría Alta (Figure 19). The last three were considered to represent past populations of *A. pinsapo* as it is no longer present in these areas.

The charcoal concentration has been analysed in 37 soil samples collected since 2014 from a total of 25 pedoanthracological sites. Within this extensive sampling network, the charcoal values vary enormously from one site to the next (Table 7).

The specific anthracomass values for *Abies* sp., from sites where it occurred, range from 441.9 mg/kg in Sierra del Pinar 1 mg/kg to 0.8 mg/kg in Jarastepar 2.

Table 7. Charcoal values in mg/kg soil sample, number of samples and specific anthracomass of *Abies* sp.

Number	Site	Total anthracomass (mg/kg)	Nº fragments of <i>Abies</i>	Specific anthracomass of <i>Abies</i> sp. (mg/kg)
1	Palmitera 1	137 379.3	23	233.6
2	Palmitera 2	7066.3	-	-
3	Palmitera 3	7831.6	-	-
4	Palmitera 4	99.6	-	-
5	Los Reales 1	1965	20	8.4
6	Los Reales 2	2115.2	98	37.5
7	Los Reales 3	197.1	-	-
8	Los Reales 4	98.4	-	-
9	Puerto del Hoyo	413.7	-	-
10	Majada del Toro	1.4	-	-
11	Arroyo del Toro	15.3	-	-
12	Cascajares	17.6	-	-
13	Navacillo	39.7	-	-
14	Cañada de Enmedio	1039.4	23	159.3
15	Cancha de Almola	25.7	-	-
16	Puerto de Lifa	9.6	-	-
17	Cañada del Cuerno	27.5	-	-
18	Fuenfría Alta	651.7	3	9.8
19	Cerro de los Sauces	287.5	-	-
20	Jarastepar 1	25	-	-
21	Jarastepar 2	9.3	3	0.8
22	Jardón 1	289.5	-	-
23	Jardón 2	185.2	-	-
24	Pº de los Valientes	475.7	9	21.4
25	Pilones 1	118.4	-	-
26	Pilones 2	143	-	-
27	Puerto de la Encina	234.3	-	-
28	Cerro Barretos	1461.1	-	-
29	Navacillo 1 (base)	22	-	-
30	Navacillo 2 (base)	136.5	-	-

31	Terril (summit)	49.7	-	-
32	Tablón (base)	186.4	-	-
33	Lijar	5.2	-	-
34	Llanos de Rabel	80.3	-	-
35	Sierra del Pinar 1	8285	8	441.9
36	Sierra del Pinar 2	129.8	3	10.2
37	Sierra de los Pinos	30.8	-	-
	TOTAL		190	470.8

Source: own elaboration.

10.3.2. Charcoal dates

Table 8 shows the various radiocarbon ages obtained for the 47 fragments of *Abies* sp. dated in this research, ranging from 9931 cal BP to 9616 cal BP up to sub-recent dates < 500 years old of as little as 276-78 cal BP.

The oldest dates are from Palmitera 1, Jarastepar 2, Los Reales 1 and Fuenfría Alta, with ages very close to 10 000 cal BP (ranging between 9931-9616 cal BP and 9619 cal BP), while the most recent sub-recent dates are from Los Reales 1 (326-208 cal BP and 294-102 cal BP), Los Reales 2 (295-103 cal BP and 282-82 cal BP) and Puerto de los Valientes (383 cal BP and 380 cal BP).

The site with the most complete chronological range is Palmitera 1, with 15 dates ranging from 9931-9916 cal BP to 5441-5145 cal BP, thus covering a substantial part of the early and middle Holocene. By contrast, Cañada de Enmedio has a limited chronological range with exclusively sub-recent dates, ranging from 326-208 cal BP to 276-78 cal BP. Other sites with sub-recent dates are Los Reales 1 (three dates between 326-208 cal BP and 294-102 cal BP), Los Reales 2 (three dates between 295-103 cal BP and 282-82 cal BP) and Puerto de los Valientes (two dates between 383 cal BP and 380 cal BP).

Table 8. C¹⁴ dates of *Abies* sp. by sites. Dates by Poznań radiocarbon laboratory (Poznań, Poland) and AlfredWegener-Institut (Bremerhaven, Germany).

Site	Level	Conventional	Calibrated age	Laboratory
Palmitera 1	V	8707 ± 37	9931-9616	5173.1.1
	V	8573 ± 35	9719-9551	5174.1.1
	V	8549 ± 36	9552	5176.1.1
	V	8300 ± 40	9266-9206	5175.1.1
	V	8155 ± 39	9245-9076	5177.1.1
	V	8003 ± 128	9236-8615	5170.1.1
	V	8057 ± 111	8672	5171.1.1
	V	7300 ± 50	8342-8053	Poz-83921
	IV	7142 ± 34	8001-7944	5169.1.1
	IV	6480 ± 40	7516-7356	Poz-78851
	V	6239 ± 35	7224-7085	5172.1.1
	IV	5710 ± 40	6651-6473	Poz-78852
	V	5840 ± 40	6607-6573	Poz-83920

	IV	5770 ± 40	6553-6523	Poz-83922
	IV	4605 ± 35	5441-5145	Poz-83924
Los Reales 1	III	8860 ± 50	9810	Poz-83919
	II	6160 ± 40	7014	Poz-83918
	I	200 ± 30	326-208	Poz-78858
	I	195 ± 30	325-143	Poz-78859
	I	60 ± 30	294-102	Poz-78885
Los Reales 2	IV	3270 ± 30	3516-3476	Poz-82525
	III	1800 ± 30	1832-1674	Poz-82527
	I	45 ± 30	295-103	Poz-83914
	II	40 ± 30	295-103	Poz-83913
	II	110 ± 30	282-82	Poz-83912
Cañada de Enmedio	III	200 ± 30	326-208	Poz-113828
	I	180 ± 30	322-137	Poz-113846
	II	180 ± 30	322-137	Poz-113848
	II	170 ± 30	320-131	Poz-113827
	I	50 ± 30	295-103	Poz-113270
	II	15 ± 30	295-103	Poz-113784
	II	80 ± 30	291-79	Poz-113847
	II	115 ± 30	280-80	Poz-113829
	II	125 ± 30	276-78	Poz-113826
Puerto de los Valientes	IV	1197 ± 73	1030	5160.1.1
	IV	360 ± 30	491-385	Poz-113772
	I	345 ± 30	383	Poz-113771
	I	335 ± 30	380	Poz-113773
Fuenfría Alta	III	8740 ± 50	9619	Poz-113780
	I	4970 ± 35	5897-5668	Poz-113779
	I	5015 ± 35	5726-5679	Poz-113778
Jarastepar 2	I	9038 ± 121	9830	5162.1.1
	I	8861 ± 122	9669-9629	5163.1.1
	I	8637 ± 40	9606	5161.1.1

Source: own elaboration.

10.4. Discussion

10.4.1. New data on the past distribution of *Abies* in southern Spain

The results obtained in this research make a valuable contribution to palaeobiogeographic knowledge of this taxón in southern Spain by offering a more accurate and detailed picture of its former distribution there. In particular, the discovery of charcoal of *Abies* sp. from three sites in the Serranía de Ronda where it is not currently present enables us to corroborate our initial hypothesis, that *A. pinsapo* once had a wider distribution than it has today. This confirms the assertions of Linares (2011) who, on the basis of fossil records of *Abies* spp. from around the Mediterranean, suggested the existence of a common ancestor which was widely distributed across the western Mediterranean during the Cenozoic. The fragmentation of this original population probably took place in the Oligocene about 30-25 Ma, as a result of the tectonic processes that produced the break-up of the ancient Hercynian Belt of mountains in Spain

(Magri et al., 2017), so causing the division of this ancestral *Abies* into separate species in geographically and genetically isolated populations (Rosenbaum & Lister, 2004).

Alba-Sánchez & López-Sáez (2013) noted that pollen from *Abies* has been found in different parts of the Cordillera Bética from ponds, peat bogs or caves in Málaga, Granada, Almería, Jaén, Alicante, Valencia, Castellón and Gibraltar, and that this almost certainly belonged to *A. pinsapo*, the only fir that grows naturally in southern Spain, so raising the possibility that it was much more widely distributed in the past (Alba-Sánchez et al., 2018). In the south of the Iberian Peninsula, there is a great deal of pollen-based evidence of *Abies* sp. during the Holocene, from a range of sites across Andalucía, including Antas (Almería), Cueva del Cucú (Almería), Roquetas de Mar (Almería), Cueva del Boquete de Zafarraya (Granada), Cueva de las Ventanas (Granada), Laguna del Padul (Granada), Laguna de Río Seco (Granada), Cueva del Bajondillo (Málaga) and Gorham's Cave (Gibraltar). The last two sites are the closest to the present day distribution area of *A. pinsapo*. In many cases, the pollen count for *Abies* sp. accounted for over 3-5 % of the total pollen from a particular period at a site, which together with the very low dispersion capacity of *A. pinsapo* pollen, just a few dozen kilometres, suggests its past presence near these sites (Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013). The pollen analysis from Gorham's Cave revealed the presence of *Abies* during the Upper Palaeolithic, around 16 000–19 000 cal BP, so demonstrating that this area in the south of the Iberian Peninsula acted as a refuge for *A. pinsapo* and for a large number of mesophilous and thermophilous taxa (Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013). The dates obtained from the Cueva del Bajondillo show that *Abies* sp. was present there around 7400 cal BP, during one of the coldest and wettest phases of the early Holocene (Reed et al., 2001; Alba-Sánchez & López-Sáez 2013). This probably confirms the presence of *A. pinsapo* in some areas of the Cordillera Bética during the early and middle stages of the Holocene, as also demonstrated by pedoanthracological analysis, before later receding to its current relict distribution area (Linares, 2011). *A. pinsapo* was present in the cirque of Río Seco in the Sierra Nevada (about 3000 m) at 1200–1100 cal BP, which suggests that it moved to higher altitudes in the southernmost Cordillera Bética mountains during recent millennia (Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; Alba-Sánchez et al., 2018). Other species of conifers have shown similar dynamics and are also considered as Holarctic relicts in the Cordillera Bética, including *Taxus baccata* (yew) and *Pinus sylvestris* (Scots pine), whose populations have been declining over the last few millennia as a result of habitat loss (Olmedo-Cobo, 2012; Olmedo-Cobo & Gómez-Zotano, 2014). Intense human pressure together with a warmer climate are the main reasons for the progressive confinement of these taxa to their current relict distribution areas, whose natural southern boundary is in the westernmost physiographic areas of the Cordillera Bética in Spain and Rif mountains in Morocco (Ruiz de la Torre, 2006).

Together with the evidence from pollen records, the pioneering development of studies of soil charcoal in Serranía de Ronda, focusing on the peridotite (ultramafic igneous rock) area of Sierra Bermeja, developed by Gómez-Zotano et al. (2017, 2018) and Olmedo-Cobo et al. (2016, 2017, 2019ab) has resulted in the discovery for the first time of charcoal fragments of

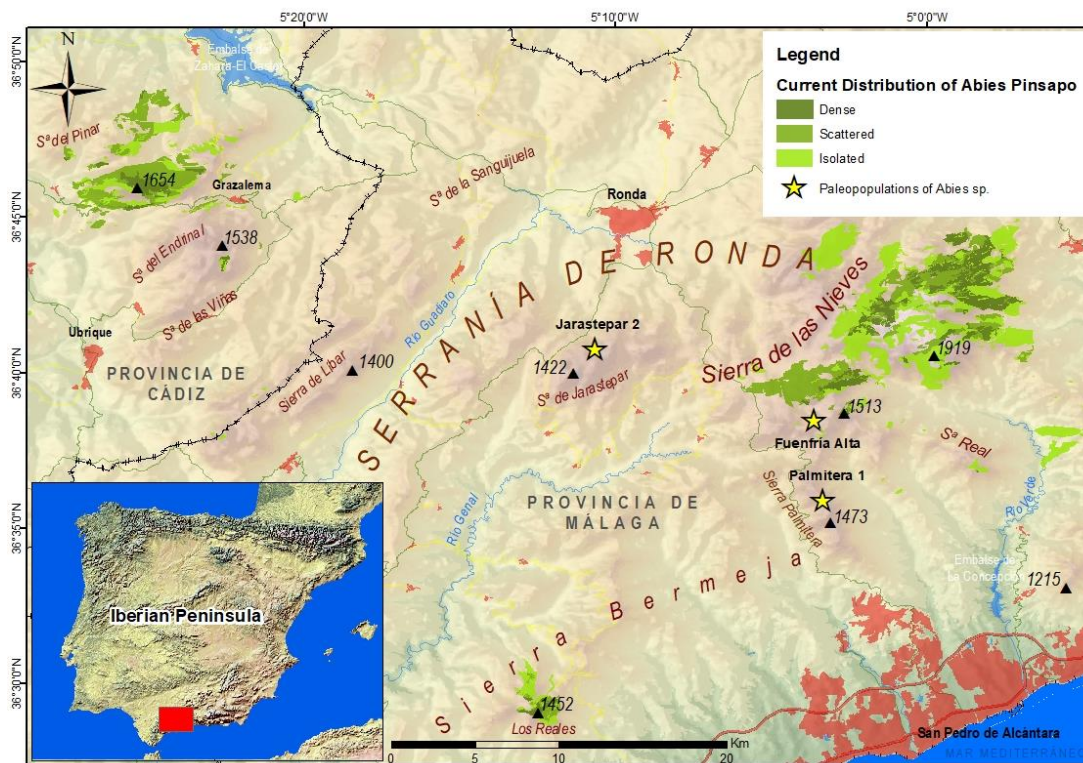
Abies in an area where *A. pinsapo* is not found today. This site, Palmitera 1, provided the first palaeoecological evidence probably of *A. pinsapo* from pedoanthracological analysis on Sierra Bermeja. Further charcoal remains of *Abies* sp. were also discovered in Fuenfría Alta and Jarastepar 2 (Figure 20). These finds together with dating of the charcoal fragments enabled us to obtain a more accurate picture of its distribution at various sites in the south of the Iberian Peninsula at various times in the Holocene. Of the 194 fragments of *Abies* charcoal from these three sites, 47 were dated to over 1000 cal BP and many were much older, spanning practically all the Holocene. This confirms the role of certain mountain refuges for *Abies* during the constant climatic changes which caused advances and retreats of glaciers, and also the reduction and fragmentation of the distribution areas of the taxa best adapted to temperate climates (van der Veken et al., 2007; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013). One of these refuges was the site referred to here as Jarastepar 2, in the centre of the Serranía de Ronda, which acted as an important link in the chain during the westward migration of *A. pinsapo*, connecting the populations in the Sierra de Grazalema (Cádiz) with the Sierra de las Nieves (Málaga). The fir populations indicated by the sites Palmitera 1 and Fuenfría Alta then connected this population at Sierra de las Nieves to the southernmost place with of *A. pinsapo* on the Iberian Peninsula, on the serpentine rock area of Sierra Bermeja.

The dates of the charcoal fragments confirm the absence of stratification in the mountain soils of the Cordillera Bética, as with their alpine and sub-alpine counterparts (Carcaillet, 2001). The result is that charcoal fragments that date from rather recent times were found at relatively deep levels at some sites, such as for example Level III of Cañada de Enmedio (326-208 cal BP) or Level IV of Puerto de los Valientes (491-385 cal BP). At other sites quite the opposite occurred, with charcoal fragments aged several thousand years old being found near the surface, such as in Level I of Fuenfría Alta (5897-5668 cal BP). Differently aged fragments can also be found within the same level as a result of plant growth and bioturbation (Carcaillet & Thinin, 1996).

Another source of information on *A. pinsapo* comes from historical sources, including various references to Spanish fir since the 16th century, recording a wider distribution area than we know today (Guzmán et al., 2013). These sources include historical data collected by Gil (2002), Gómez-Zotano (2004, 2006) and Becerra (2006) in documents such as the municipal ordinances of the city of Ronda and its jurisdictional area in 1508; the ordinances of the town of Zahara de la Sierra in 1575; inventories of timber to supply the navy or for building houses in Villaluenga in 1754 and 1766; news about the “Pino del Oso” used to mark the border between Ronda and Tolox in 1635, 1809 and 1870; general and specific questions from the Catastro del Marqués de la Ensenada (land survey of the Marquis of Ensenada) for the different villages in the area in the middle of the 18th century; geographical and general maps of the villages and their main wooded areas in the provinces of the navy in the mid 18th century, considered as the first quantitative attempt to measure the area of *A. pinsapo* woods, the Diccionario de Andalucía by Tomás López published in 1780; the Diccionario Enciclopédico by Pascual Madoz of 1845-1850 and finally the written accounts of travellers, hunters, engineers and naturalists such as William Bowles in 1752, Simón de Rojas Clemente in 1809, Charles Edmond Boissier in 1837,

Samuel Edward Cook Widdrington in 1829 and 1839, Moritz Willkomm in 1844, Antonio Laýnez in 1858, Mariano Laguna in 1868, Abel Chapman and Walter J. Buck in 1907, Luís Ceballos and Manuel Martín Bolaños in 1928 and 1930, A. Barbey in 1930 and Luís Ceballos and Carlos Vicioso in 1933 (Guzmán et al., 2013). Both general and specific references increased greatly from the end of the 19th century and in the first half of the 20th.

Figure 20. Current distribution of *Abies pinsapo* and ancient populations of *Abies* sp. discovered in this research.



Source: own elaboration based on data from CNIG and IECA.

Various studies have been made of the habitats and ecological niches of *A. pinsapo*. These include the phytogeographic studies by Rivas-Martínez (1973) and Asensi & Rivas-Martínez (1976) on the woods of *Paeonio broteroi-Abietetum pinsaponis* in the Rondeño part of the Sierra de las Nieves; a reference study on the Bermeja part of Sierra Bermeja of the community *Bunio macucae-Abietetum pinsaponis* was made by Pérez Latorre et al. (1998); Ceballos & de Cordoba (1966) were pioneers in the study of *A. pinsapo* in the Sierra del Pinar in Grazalema, also considered part of the Rondeño. Subsequent studies (Ruiz de la Torre, 1990; Oria de Rueda et al. 1991; Ruiz de la Torre et al., 1994; Pérez Latorre et al., 1998; Navarro et al., 2006a; Valladares, 2009; López-Quintanilla, 2015) have revealed that, scattered around these main areas with *A. pinsapo*, there are also small populations and isolated individual trees within other types of woodland, together with other smaller woods in Ojen, Monda, Istán, etc.

The main species distribution models (SDMs) applied to *A. pinsapo* (Navarro-Cerrillo et al., 2006a; Alba-Sánchez et al., 2010; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; Gutiérrez-Hernández, 2018) were based on suitability patterns and multivariable regressions to establish different

degrees of potential for this species to grow in particular mountain areas in the south and southeast of Spain, covering an area that was much larger than the Serranía de Ronda (in that it also included the Sierras de Almirajara-Tejeda, Sierra Nevada, Sierras de Cazorla-Segura and Sierra de Aitana). In this study area, these models showed a high level of suitability for *A. pinsapo* almost everywhere above 800-1000 m. This means that it could potentially thrive in a large part of the vast limestone and peridotite area that surrounds the current *A. pinsapo* woods sheltered among some of the peaks of the Serranía de Ronda. The areas of high potential described by these models include the three ancient populations of *Abies* sp. discovered in our pedoanthracological sampling. However, the current global climate change suggests that in the future there could be a progressive loss of suitable ecological niches for *A. pinsapo*, above all due to rising temperatures, a change that would cause it to migrate to higher altitudes, so resulting in increasing fragmentation of habitat and vulnerability to forest fires (Gutiérrez-Hernández, 2018). This information from SDMs which was later mapped is an ideal framework for our research, as a starting point for the selection of possible sites for future soil charcoal excavations. In turn, the results of our research have offered accurate answers to some of the unknowns that form an inevitable part of theoretical modelling procedures.

10.4.2. The role of fire in forming the plant landscape of the Serranía de Ronda

Fire has been one of the most important agents of change in the plant landscape over the course of history and is a key factor in the great diversity of vegetation associated with the Mediterranean climate (Bond & Keeley, 2005). The high charcoal values (137 379 mg/kg) from the Palmitera 1 site situated in the peridotite area of Sierra Bermeja reveal the significance of past fires for the vegetation of this mountainous area throughout the Holocene. In fact, fires continue to be a regular feature of the Sierra Bermeja, where Vega-Hidalgo (1999) found a recurrence period of 14.5 years. This frequent burning, together with the unusual topography of Palmitera 1 in the form of an enclosed basin helps explain the vast concentration of charcoal found there. By contrast, sites on calcareous soils such as Jarastepar 1 and 2, among others, have shown very low levels of charcoal, and low charcoal has also been noted in studies of dolomitic limestone soils in the north of the Iberian Peninsula, such as those in the Sierra del Aramo, Cantabria (Beato-Bergua et al., 2019). This could be because limestone does not readily form soils and these do not retain much charcoal, above all in areas with a moderate to steep slopes which have an effective soil formation during the Holocene of less than 1 cm (Farrús et al., 2002). However, larger quantities of materials may accumulate in low lying areas, so encouraging soil formation (Daniels & Hammer, 1992). Although this correlation could be used to reject certain locations for future soil charcoal analysis, the relatively small number of sites studied so far on sedimentary materials in Spain obliges us to be cautious about rejecting sites.

The dates of charcoal fragments from Jarastepar 2, Los Reales 1, Fuenfría Alta and Palmitera 1 revealed that some were almost 10 000 years old, coinciding with the beginning of the climatic recovery which took place after the Late Glacial period (López & López, 1999). Various taxa began to spread at this time including *A. pinsapo*, which found a habitat in some of these places

in the south of the Iberian Peninsula (Carrión et al., 2003). During this period before the Neolithic, the lack of palaeoenvironmental evidence indicates that the hunter-gatherers had virtually no influence on the natural vegetation (Fernández-Rodríguez et al., 2007). It is therefore very likely that at the start of the Holocene the fires in these ancient habitats of *A. pinsapo* could have been due to natural causes, resulting from increasingly warm and arid conditions in this area (Jalut et al., 2000; Cacho et al., 2001). In the following period, during the Neolithic, a total of nine signs of fire were detected in three of the four sites mentioned above (Los Reales 1, Fuenfría Alta and Palmitera 1), but none in Jarastepar 2. These nine episodes of fire were concentrated in the part of the study area on ultramafic rock and are dated to between 7014 cal BP in Reales 1 cal BP and 5441-5,145 cal BP in Palmitera 1. These fires may have been the result of human activity, from the progressive increase in the population in coastal areas very near Sierra Bermeja (Navarro et al., 1993; Fernández-Rodríguez et al., 2007). The existence of a particularly intense Neolithic settlement process (8000-6000 cal BP) associated with caves in karst landscapes would help support this theory (Romo et al., 2008).

There is very little evidence of fire in the study area from the end of the Neolithic about 5000 years ago up to just a couple of centuries ago. Just two episodes were detected in Los Reales 2, from 3516-3476 cal BP to 1832-1674 cal BP, as well as evidence of one last ancient fire in Puerto de los Valientes (Sierra de las Nieves), which was dated to 1345-1040 cal BP. However, over the last few centuries, as shown by various different documentary sources (Vega-Hidalgo, 1999; Gómez-Zotano, 2004, 2006), the signs of fire intensified again, especially from the eighteenth century onwards and 18 charcoal samples were dated between 491-385 cal BP and 276-78 cal BP.

10.4.3. The role of soil charcoal in palaeoecological studies

The application of pedoanthracological analysis in various Spanish mountain ranges has enabled us to make significant progress in the reconstruction of their past environments. This was first applied in the Pyrenees of Catalonia by Cunill (2010) and since then has been extended to the Cordillera Bética, the Sistema Central and the Cordillera Cantábrica. In the Pyrenees mountains, Cunill et al. (2012, 2013) analysed the changes in the landscape above 2000 m a.s.l., paying particular attention to changes in the treeline, while in the Sierra de Gredos (Sistema Central), García-Álvarez et al. (2017) concentrated on changes in the tree canopy during the Holocene, and especially to the role played by forest fires in the formation of the current plant landscape. Research by Beato-Bergua et al. (2019) in the Cordillera Cantábrica increased biogeographical knowledge of both the present and past situation of *Taxus baccata* (yew) trees in the central mountains of Asturias, so making a decisive contribution to the conservation of a relict species in danger of extinction.

The present research helps to consolidate the efforts made so far in the application of soil charcoal in palaeoecological studies in different parts of the Cordillera Bética. This technique has not only enabled us to find out more about the past of *A. pinsapo*, in both biological and

geographical terms, but has also helped resolve some of the long-standing phytosociological questions about the plant community. In this way the pedoanthracological analysis carried out at various sites in Sierra Bermeja together with evidence from pollen, phytogeographical studies and species distribution models (SDMs) have enabled researchers to confirm the native character of *Pinus pinaster* on ultramafic soils (Olmedo-Cobo et al., 2019ab), so confirming the role of the conifers *A. pinsapo* and *P. pinaster* in climax woodland in the Serranía de Ronda during the Holocene.

The discovery of ancient populations of *A. pinsapo* in mountainous areas where it is currently absent, and outside protected natural areas or those covered by the plan for the recovery of *A. pinsapo*, makes an excellent contribution to identifying the complex past distribution of this species with a view to its effective future management. However, our knowledge of the palaeobiogeography of *A. pinsapo* is far from complete in spite of the widespread development of methodologies and techniques for the restoration of the landscape in recent years.

The results of this research also make an important contribution to the Programa de Actuación del Plan de Recuperación del Pinsapo (Programme of action for the recovery of the Spanish fir) (2015-2019) (Junta de Andalucía, 2011). In particular they have been integrated into the Líneas Estratégicas del Programa Sectorial del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación (Strategic Lines of Action for the Sectorial Programme of the Andalusian Plan for Research, Development and Innovation) for carrying out research projects which can help enhance the management of Spanish fir and associated species: (a) archaeobotanical studies which help us to understand the dynamics of *A. pinsapo* associated with changes in the climate during the Quaternary; (b) historical records of distribution of *A. pinsapo*.

10.5. Conclusions

The results of this research have enabled us to 1, discover the present and potential area and distribution of *A. pinsapo* by using available sources of information and by characterising the study area in both geographical and phytogeographical terms; 2, determine the past area of *A. pinsapo* by analysing soil charcoal fragments, providing new data about its ancient distribution area; 3, discover more about the dynamics of *A. pinsapo* during the Holocene, the factors affecting it (climatic or human) and the successive stages through which the fir woods must have passed before being confined to their current restricted habitats; 4, compare the soil charcoal records with historical data and the species distribution models, and above all the characteristics of the natural habitats and ecological niches currently occupied by this species as a basis for its conservation and management.

The results obtained in this research, once they have been compared with those obtained from geohistorical, botanical and palaeoenvironmental (above all palaeoclimatic) studies could be of great importance as a basis for developing a strategy for the preservation and regeneration of *A. pinsapo*. These new possibilities for conservation and management could be applied in both

the places where *A. pinsapo* is found today, and in others that have high potential as a future habitat for it, as established using suitability models and multivariate regressions.

For all these reasons, future efforts must focus on transferring the results of research to public administrations and private companies with responsibilities in the management of this emblematic woodland resource. Palaeobiogeographical reconstruction of the past distribution of *A. pinsapo* could also be used to develop a model for the ecological connectivity of existing *A. pinsapo* areas, an effective tool for the future preservation of this fir and its woods.

References

- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Benito, B., Linares, J.C., Nieto-Lugilde, D. & López-Merino, L. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: a phytogeographic approach using fossil pollen data and species distribution models. *Diversity and Distributions*, 16(2), 214–228. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00636.x>
- Alba-Sánchez, F. & López-Sáez, J.A. (2013). Paleobiogeografía del pinsapo en la Península Ibérica durante el Cuaternario. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 33–52). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Alba-Sánchez, F., Abel-Schaad, D., López-Sáez, J.A., Sabariego Ruiz, S., Pérez-Díaz, S. & González-Hernández, A. (2018). Paleobiogeografía de *Abies* spp. y *Cedrus atlantica* en el Mediterráneo occidental (península ibérica y Marruecos). *Ecosistemas*, 27(1), 26–37. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1441>
- Asensi, A. & Rivas-Martínez, S. (1976). Contribución al conocimiento fitosociológico de los pinsapares de la Serranía de Ronda. *Anal. Inst. Bot. Cavanilles*, 33, 239–247.
- Beato-Bergua, S., Poblete-Piedrabuena, M.A., & Cunill-Artigas, R. (2019). *Taxus baccata* en la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 1–30. <https://doi.org/10.21138/bage.2772>
- Becerra, M. (2006). *Ordenación y aprovechamiento de los pinsapares rondeños durante el siglo XIX. La memoria de Antonio Laýnez*. Editorial La Serranía.
- Blanes, M.C., Viñegla, B., Merino, J. & Carreira, J.A. (2013). Nutritional status of *Abies pinsapo* forests along a nitrogen deposition gradient: do C/N/P stoichiometric shifts modify photosynthetic nutrient use efficiency? *Oecologia*, 171, 797–808. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2454-1>
- Bond, W.J. & Keeley, J.E. (2005). Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>

- Cacho, I, Grimalt, J.O., Canals, M. Sbfii, L., Shackleton, N.J. et al. (2001). Variability of the western Mediterranean Sea surface temperature during the last 25,000 years and its connection with the Northern Hemisphere climatic changes. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 16(1), 40–52. <https://doi.org/10.1029/2000PA000502>
- Carcaillet, C. (2001). Are Holocene wood-charcoal fragments stratified in alpine and subalpine soils? Evidence from the Alps based on AMS 14C dates. *The Holocene*, 11(2), 231–242. <https://doi.org/10.1191/095968301674071040>
- Carcaillet, C. & Thion, M. (1996). Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary results. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 91(1), 399–416. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00060-7)
- Carrión, J.S., Yll, E.I., Walker, M.J., Legaz, E.J., Chaín, C. et al. (2003). Glacial refugia of temperate, Mediterranean and Ibero-North African flora in south-eastern Spain: new evidence from cave pollen at two Neanderthal man sites. *Global Ecology and Biogeography*, 12(2), 119–129. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00013.x>
- Ceballos, L. & de Cordoba, F. (1966). *Mapa forestal de España*. Ministerio de Agricultura.
- Choe, H., Thorne, J.H. & Seo, C. (2016). Mapping National plant biodiversity patterns in South Korea with the MARS species distribution model. *PLOS One*, 11(3), e0149511. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149511>
- Cunill, R. (2010). *Estudi interdisciplinari de l'evolució del límit superior del bosc durant el període holocènic a la zona de Plaús de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català* (Tesis Doctoral). Universidad Autònoma de Barcelona.
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A. & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(4–5), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00334-011-0342-y>
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A., Rodríguez, J.M. et al. (2013). Holocene high-altitude vegetation dynamics in the Pyrenees: a pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach. *Quaternary International*, 289, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.04.041>
- Daniels, R.B. & Hammer, R.D. (1992). *Soil geomorphology*. Wiley.
- De Vita, P., Serrano, M.S., Luchi, N., Capretti, P., Trapero, A. et al. (2010). Susceptibility of *Abies pinsapo* and its tree cohort species to *Heterobasidion abietinum*. *Forest Pathology*, 40(2), 129–132. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2009.00619.x>

- Esteban, L.G., de Palacios, P. & Rodríguez-Losada, L. (2010). *Abies pinsapo* forests in Spain and Morocco: threats and conservation. *Oryx*, 44(2), 276–284. <https://doi.org/10.1017/S0030605310000190>
- Farrús, E., Viète, L., Calafat, A. & Vadell, J. (2002). Toposecuencias de suelos desarrollados sobre dos litologías contrastadas: calizas margosas y calizas duras. *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 45, 21–43.
- Fernández-Rodríguez, L.E., Suárez-Padilla, J., Tomassetti-Guerra, J.M. & Navarro-Luengo, I. (2007). Corominas, una necrópolis megalítica en el ámbito litoral malagueño. *Mainake*, 29, 513–540.
- García-Álvarez, S., Bal, M.C., Allée, P., García-Amorena, I. & Rubiales, J.M. (2017). Holocene treeline history of a high-mountain landscape inferred from soil charcoal: The case of Sierra de Gredos (Iberian Central System, SW Europe). *Quaternary International*, 457(1), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.04.019>
- Gil, A. (2002). *Simón de Rojas Clemente. Viaje a Andalucía. Historia Natural del Reino de Granada*. GBG Editora.
- Gómez-Zotano (2004). *El papel de los espacios montañosos como traspais del litoral mediterráneo andaluz, el caso de Sierra Bermeja (provincia de Málaga)* (Tesis Doctoral). Universidad de Granada.
- Gómez-Zotano, J. (2006). *Naturaleza y paisaje en la Costa del Sol Occidental*. Servicio de Publicaciones Centro de Ediciones de la Diputación de Málaga.
- Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2020). *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal*. Editorial La Serranía.
- Gómez-Zotano, J., Alcántara-Manzanares, J., Martínez-Ibarra, E. & Olmedo-Cobo, J.A. (2016). Applying the technique of image classification in climate science: the case of Andalusia (Spain). *Geographical Research*, 54(4), 461–470. <https://doi.org/10.1111/1745-5871.12180>
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Martínez-Ibarra, E. (2017). Descubrimiento y caracterización geográfica de una depresión ultramáfica en Sierra Bermeja: nuevos datos geomorfoedáficos, fitogeográficos y paleoecológicos. *Pirineos*, 172. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172001>
- Gómez-Zotano, J., Cunill-Artigas, R., Olmedo-Cobo, J.A. & Arias-García, J. (2018). Análisis pedoantracológico y propuesta de conectividad ecológica de *Abies pinsapo* en la Red Natura 2000 de Sierra Bermeja. En Gosálbez, R.U., Díaz, M.C., García, J.L., Serrano de la Cruz, M.A. & Jerez, O. (Eds.), *Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación. Aportaciones desde la Biogeografía* (pp. 635–645). Almud, Ediciones de Castilla La Mancha.

- Guisan, A. & Zimmermann, N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3), 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Gutiérrez-Hernández, O. (2018). Impacto del calentamiento global en la distribución y supervivencia del pinsapo (Serranía de Ronda). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 76, 504–549. <https://doi.org/10.21138/bage.2532>
- Guzmán, J.R., Catalina, M.A., Navarro-Cerrillo, R.F., López-Quintanilla, J. & Sánchez, R. (2013). Los paisajes del pinsapo a través del tiempo. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 111–158). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Jacquot, C., Robin, A.M. & Bedeneau, M. (1973). Reconstitution d'un ancien peuplement forestier en forêt de Fontainebleau par l'étude anatomique de charbons de bois et leur datation par le 14C. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 120(5-6), 231–233. <https://doi.org/10.1080/00378941.1973.10839161>
- Jalut, G., Esteban, A., Bonnet, L., Gauquelin, T. & Fontugne, M. (2000). Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(3-4), 255–290. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00075-4)
- Jaramillo-Correa, J.P., Grivet, D., Terrab, A., Kurt, Y., De Lucas, A.I. et al. (2010). The Strait of Gibraltar as a major biogeographic barrier in Mediterranean conifers: a comparative phylogeographic survey. *Molecular Ecology*, 19(24), 5452–5468. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04912.x>
- Junta de Andalucía (1996-1999). *Bases para el manejo y conservación del pinsapar del Parque Natural Sierra de Grazalema*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía (2003). *Programa de Actuaciones para la Conservación del Pinsapo*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía (2008). *Proyecto de actuaciones de mejoras y recuperación para Abies pinsapo en las provincias de Cádiz y Málaga*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía (2011). *Programa de Actuación del Plan de Recuperación del Pinsapo (2015–2019)*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía (2012). *Guía de los paisajes del pinsapar. Un recorrido histórico a partir de las referencias históricas previas al siglo XXI*. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.
- Junta de Andalucía (2013). *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.

- Liétor, J. (2002). Patrones de disponibilidad y limitación por nutrientes como indicadores de estado en masas de pinsapo (*Abies pinsapo* Boiss.) (Tesis Doctoral). Universidad de Jaén.
- Linares, J.C. (2011). Biogeography and evolution of *Abies* (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: the roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 38(4), 619–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02458.x>
- Linares, J.C., Delgado-Huertas, A., Camarero, J.J., Merino, J. & Carreira, J.A. (2009). Competition and drought limit the response of water-use efficiency to rising atmospheric carbon dioxide in the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *Oecologia*, 161(3), 611–624. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1409-7>
- Linares, J.C., Camarero, J.J. & Carreira, J.A. (2010). Competition modulates the adaptation capacity of forests to climatic stress: insights from recent growth decline and death in relict stands of the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *Journal of Ecology*, 98(3), 592–603. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01645.x>
- Linares, J.C., Camarero, J.J., Bowker, M.A., Ochoa, V. & Carreira, J.A. (2010b). Stand-structural effects on *Heterobasidion abietinum*-related mortality following drought events in *Abies pinsapo*. *Oecologia*, 164(4), 1107–1119. <https://doi.org/10.1007/s00442-010-1770-6>
- Linares JC, Carreira JA, Ochoa V (2011a) Human impacts drive forest structure and diversity. Insights from Mediterranean mountain forest dominated by *Abies pinsapo* (Boiss.). *Eur J for Res* 130:533–542. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0441-9>
- Linares, J.C., Delgado-Huertas, A. & Carreira, J.A. (2011b). Climatic trends and different drought adaptive capacity and vulnerability in a mixed *Abies pinsapo*–*Pinus halepensis* forest. *Climate Change*, 105, 67–90. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9878-6>
- Linares, J.C., Ochoa, M.V. & Carreira, J.A. (2013). Efecto de entresacas de diversificación estructural. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp 465–479). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- López, P & López, J.A. (1999). Rasgos paleoambientales de la transición Tardiglaciario-Holoceno (16–7.5 ka BP) en el Mediterráneo ibérico, de Levante a Andalucía. En Aguirre, E. (Ed.), *Geoarqueología i Quaternari litoral* (pp. 139–152). Universitat de Valencia.
- López-Quintanilla, J. (2013). *Los pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Universidad de Córdoba.
- López-Quintanilla, J. (2015). *II Plan de Recuperación del Pinsapo*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- López-Tirado, J. & Hidalgo, P. (2014). A high resolution predictive model for relict trees in the Mediterranean-mountain forests (*Pinus sylvestris* L., *P. nigra* Arnold and *Abies pinsapo*

- Boiss.) from the south of Spain: A reliable management tool for reforestation. *Forest Ecology and Management*, 330, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.009>
- Magri, D., Di Rita, F., Aranbarri, J., Fletcher, W. & González-Sampériz, P. (2017). Quaternary disappearance of tree taxa from Southern Europe: timing and trends. *Quaternary Science Reviews*, 163, 23–55. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.02.014>
- Mauthe, F. (1971). La geología de la Serranía de Ronda (Cordillera Bética Occidental). *Boletín Geológico y Minero*, 82, 1–36
- McCune, J.L. (2016). Species distribution models predict rare species occurrences despite significant effects of landscape context. *Journal of Applied Ecology*, 53(6), 1871–1879. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12702>
- Miller, J. (2010). Species Distribution Modeling. *Geography Compass*, 4(6), 490–509. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00351.x>
- Navarro, I., Fernández, L.E., Suárez, J. & Vinceiro, F.J. (1993). Avance al estudio del yacimiento de los Castillejos (Estepona, Málaga). Los materiales prehistóricos de superficie. En Xunta de Galicia (Ed.), *Actas del XXII Congreso Nacional de Arqueología* (pp. 87–98). Junta de Galicia.
- Navarro-Cerrillo, R.M., Camarero, J.J., Manzanedo, R.D., Sánchez-Cuesta, R., López-Quintanilla, J. et al. (2014). Regeneration of *Abies pinsapo* within gaps created by *Heterobasidion annosum* induced tree mortality in southern Spain. *iForest*, 7(4), 209–215. <https://doi.org/10.3832/ifor0961-007>
- Navarro-Cerrillo, R.M., Fernández, L., Blanco-Oyonarte, P., Calzado, C., López-Quintanilla, J. et al. (2006a). Physiography potentiality of Spanish fir forests (*Abies pinsapo* Boiss.) in Andalucía. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 15, 137–152. <https://doi.org/10.5424/srf/200615S1-00988>
- Navarro-Cerillo, R.M., Retamosa, M.J., López, J., del Campo, A., Ceaceros, C. et al. (2006b). Nursery practices and field performance for the endangered Mediterranean species *Abies pinsapo* Boiss. *Ecological Engineering*, 27(2), 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.11.003>
- Olmedo-Cobo, J.A. (2012). Bosques relictos de “*Pinus sylvestris* L.” en la Sierra de Baza (provincia de Granada): análisis y cartografía del estado actual de la vegetación. *Cuadernos Geográficos*, 50, 37-62. <https://doi.org/10.30827/CUADGEO.V50I0.550>
- Olmedo-Cobo, J.A. & Gómez-Zotano, J. (2014). El tejo en el sur de España: análisis geocológico y propuesta de conservación de una población mediterránea en peligro crítico de extinción. *Bosque*, 35, 23–36. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000100003>

- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2016). Nuevos datos paleoecológicos de *Abies* ssp. en el sur de España a partir del análisis pedoantracológico en Sierra Bermeja. En Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), *Avances en Biogeografía: áreas de distribución: entre puentes y barreras* (pp. 582–591). Editorial Universidad de Granada-Tundra Ediciones.
- Olmedo-Cobo, J.A. & Gómez-Zotano, J. (2017). Los climas de la Serranía de Ronda: una propuesta de clasificación. *Takurunna*, 6-7, 23–58.
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2017). Paleoecología de *Abies* sp. en Sierra Bermeja (sur de la península ibérica) durante el Holoceno medio a partir del análisis pedoantracológico. *Bosque*, 38(2), 259–270. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200004>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Gómez-Zotano, J. (2019a). The native status of *Pinus pinaster* on serpentine soils: charcoal analysis and palaeoenvironmental history in Sierra Bermeja (southern Iberian Peninsula, Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*, 28, 417–432. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0701-z>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Gómez-Zotano, J. & Pardo-Martínez, R. (2019b). Aportaciones del análisis pedoantracológico al conocimiento paleoecológico de *Pinus pinaster* en el sur de España: el caso de Sierra Bermeja. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2667>
- Oria de Rueda, J.A., López-Quintanilla, J. & García-Viñas, J.I. (1991). Conservación y manejo de los abetales mediterráneos. *Quercus*, 61, 31–35
- Oxcal (2021). <https://c14.arch.ox.ac.uk/oxcal.html> (último acceso el 6 de agosto de 2021).
- Pérez-Latorre, A.V., Navas, P., Navas, D., Gil, Y. & Cabezudo, B. (1998) Datos sobre flora y vegetación de la Serranía de Ronda (Málaga, España). *Acta Botánica Malacitana*, 23, 149–191.
- Pérez-Latorre, A.V., Hidalgo-Triana, N., Cabezudo, B. & Martos-Martín, J. (2019). *Mapa Biogeográfico de la provincia de Málaga (España)*. Universidad de Málaga y Diputación de Málaga. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12851.89129>
- Reed, J.M., Stevenson, A.C. & Juggins, S. (2001). A multi-proxy record of Holocene climatic change in SW Spain: Laguna de Medina, Cádiz. *The Holocene*, 11(6), 707–719. <https://doi.org/10.1191/09596830195735>
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G. et al. (2020) The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>

- Rivas-Martínez, S. (1973). Avance sobre una síntesis corológica de la Península Ibérica, Baleares y Canarias. *Anal. Inst. Bot. Cavanilles*, 30, 69–87.
- Romo, J.L., Gómez-Zotano, J., Torres-Díaz, J.I. & Torres-Díaz, G. (2008). Exploraciones subterráneas en el Karst de la Utrera (Casares, Málaga). *Actas del II Congreso Andaluz de Espeleología* (pp 89–113).
- Rosenbaum, G. & Lister, G.S. (2004). Formation of arcuate orogenic belts in the western Mediterranean region. En Sussman, A.J. & Weil, A.B. (Eds.), *Orogenic curvature: Integrating paleomagnetic and structural analyses* (pp. 41–56). Geological Society of America Special Papers.
- Ruiz de la Torre, J. (1990). *Mapa forestal de España*. ICONA.
- Ruiz de la Torre, J. (2006). Distribución y características de las masas forestales españolas. *Revistas Montes*, 86, 38–53
- Ruiz de la Torre, J., García, J.I., Oria de Rueda, J.A., Cobos-Suárez, J.M., Neva-Delgado, J.C. et al. (1994). *Gestión y conservación de los pinsapares andaluces*. Asociación Forestal Andaluza.
- Sánchez-Robles, J.M., Balao, F., García-Castaño, J.L., Terrab, A., Navarro, L. et al. (2012). Nuclear microsatellite primers for the endangered relict fir, *Abies pinsapo* (Pinaceae) and cross-amplification in related Mediterranean species. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(11), 14243–14250. <https://doi.org/10.3390/ijms131114243>
- Schweingruber, F.H. (1990). *Microscopic wood anatomy: structural variability of stems and twigs in recent and subfossil woods from Central Europe*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
- Soto, D. (2006). Núcleos residuales de pinsapo perdidos en Andalucía en el siglo XX. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 79–86.
- Taberlet, P. & Cheddadi, R. (2002). Quaternary refugia and persistence of biodiversity. *Science*, 297, 2009–2010. <https://doi.org/10.1126/science.297.5589.2009>
- Talon, B., Carcaillet, C. & Thion, M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Geographie Physique et Quaternaire*, 52(2), 195–208. <https://doi.org/10.7202/004875ar>
- Vaschalde, C., Durand, A. & Thiriot, J. (2011). Vitrification and craft fire in occidental Mediterranean. Describing characteristics, first results and research hypothesis. En Badal, E., Carrion, Y., Grau, E., Macías, M. & Ntinou, M. (Eds.), *Saguntum: Papeles del Laboratorio de Arqueología de Valencia. 5th International Meeting of Charcoal Analysis; The charcoal as cultural and biological heritage* (pp 19–20). Departament de Prehistòria i Arqueologia de la Universidad de Valencia.

- Valladares, A. (2009). 9520 Abetales de *Abies pinsapo* Boiss. En VV.AA. (Ed.), *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- Van der Veken, S., Bellemare, J., Verheyen, K. & Hermy, M. (2007). Life-history traits are correlated with geographical distribution patterns of western European forest herb species. *Journal of Biogeography*, 34(10), 1723–1735. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01738.x>
- Vega-Hidalgo, J.A. (1999). Historia del fuego de *Pinus pinaster* y *Abies pinsapo* en la cara norte de Sierra Bermeja (Málaga): 1817–1997. En Araque-Jiménez, E. (Ed.), *Incendios históricos: una aproximación multidisciplinar* (pp. 279–312). Universidad Internacional de Andalucía.
- Vernet, J.L., Ogereau, P., Figueiral, I., Machado, C. & Uzquiano, P. (2001). *Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents, Sud-Ouest de l'Europe: France, Péninsule ibérique et Îles Canaries*. CNRS.

11. PALEOPOPULATIONS AND ECOLOGICAL CONNECTIVITY IN THE NATURA 2000 NETWORK: PROPOSAL FOR THE SERPENTINE-SOIL SPANISH FIRS OF SIERRA BERMEJA (SERRANÍA DE RONDA)

Abstract

One of the conservation priorities of the Natura 2000 Network is the ecological connectivity of forests and species of community interest to facilitate compliance with the obligations of the EU Habitats Directive. The location of paleopopulations and past distribution areas is a first step towards creating an ecological corridor which, with the protection enjoyed by Special Areas of Conservation, could positively impact the resilience of forest species in the face of Climate Change. The endangered relict forests of Spanish fir (*Abies pinsapo*) are endemic in the Serranía de Ronda (Baetic Cordillera, Southern Spain) and form a highly fragmented habitat of community interest. Amongst these forests, the Spanish fir forests that grow on serpentine soils of Sierra Bermeja are particularly interesting. This ultramafic mountain range has suffered the highest recurrence of forest fires in all the Serranía de Ronda, and as a result, the Spanish fir forests have been subject to processes of local extinction throughout history. In this research, we used pedoanthracology to uncover ancient locations of *Abies pinsapo*; in this way, forest fires are the main cause of the disappearance of this emblematic species in Sierra Bermeja, and their charcoal remains allowed us to make a precise reconstruction of its past distribution area. On the basis of the data obtained, an ecological corridor linking these relict forests was proposed. This corridor has now begun to be implemented with the participation of public and private social agents.

Keywords: *Abies pinsapo*; ecological corridor; local extinctions; pedoanthracology; Special Areas of Conservation.

Resumen

Una de las prioridades de conservación de la Red Natura 2000 es la conectividad ecológica de los bosques y las especies de interés comunitario para facilitar el cumplimiento de las obligaciones de la Directiva Hábitats de la UE. La localización de paleopoblaciones y áreas de distribución en el pasado es un primer paso hacia la creación de un corredor ecológico que, con la protección de que gozan las Zonas Especiales de Conservación, podría repercutir positivamente en la resiliencia de las especies forestales frente al Cambio Climático. Los bosques relictos de pinsapo (*Abies pinsapo*), en peligro de extinción, son endémicos de la Serranía de Ronda (Cordillera Bética, sur de España) y constituyen un hábitat muy fragmentado de interés comunitario. Entre estos bosques, son especialmente interesantes los pinsapares que crecen sobre los suelos serpentínicos de Sierra Bermeja. Esta sierra ultramáfica ha sufrido la mayor recurrencia de incendios forestales de toda la Serranía de Ronda, por lo que los pinsapares han estado sometidos a procesos de extinción local a lo largo de la historia. En esta investigación, hemos utilizado la pedoantracología para descubrir antiguas localizaciones de *Abies pinsapo*; de este modo, los incendios forestales –principal

causa de la desaparición de esta emblemática especie en Sierra Bermeja– y sus restos de carbón vegetal, nos han permitido realizar una reconstrucción precisa de su área de distribución en el pasado. A partir de los datos obtenidos, se propuso un corredor ecológico que uniera estos bosques relictos. Este corredor ha comenzado a ejecutarse con la participación de agentes sociales públicos y privados.

Palabras clave: *Abies pinsapo*; corredor ecológico; extinciones locales; pedoantracología; Zonas de Especial Conservación.

11.1. Introduction

The temperate Mediterranean Mountains of Europe host critical natural forest systems which make up habitats of interest and are a refuge for relict and/or endangered emblematic tree species located at the southern and altitudinal extremes of their geographical distribution areas (Médail & Diadema, 2009; Médail et al., 2019; López-Albarrado & Farris, 2022). The preservation of these orophile forests has been and continues to be an essential objective in government policies to ensure nature conservation and sustainable development in countries such as Spain, France, Italy, Greece or Portugal. In these countries, mountains and forests were among the first places to arouse public interest in nature protection, and their eco-cultural values were recognized in the declarations of the first National Parks. They have also been the subject of the most recent protection actions at the European level in that the EU's Natura 2000 Network is primarily made up of forests (Brambilla et al., 2015; Catalan et al., 2017; Kulakowski et al., 2017).

In this sense, and within the framework of the conservation priorities established in the management plans of the Special Areas of Conservation (SAC) of the Natura 2000 Network, declared as such because of the importance of their natural forest systems, particular emphasis is being placed on the ecological connectivity of both forest formations and species of community interest (Jongman, 1995; Van der Windt & Swart, 2007; Pino & Marull, 2012). The preservation of montane conifer forests made up of paleo-endemic, endangered species is of particular interest, especially in the case of Mediterranean forests situated at the southern and altitudinal extremes of their geographic distribution area and included in the Natura 2000 Network (Becker et al., 2007; Holtmeier & Broll, 2007; Ruíz-Labourdette et al., 2013).

However, the degree to which the management plans set out in this European framework have been implemented varies significantly from country to country. In Spain, for example, the limited implementation of these plans has resulted in numerous Habitats of Community Interest (HCI) containing montane conifer forests suffering excessive fragmentation due to deforestation, grazing, and forest fires over the centuries. This highly fragmented forest pattern is associated with a qualitative reduction in connectivity, which harms the resilience of many organisms in the face of Climate Change (Krosby et al., 2010).

One clear example is the Spanish fir or *Abies pinsapo* Boiss. (HIC 9250), relict tree formations descended from ancient tertiary forests, which find biogeographical refuge in relatively inaccessible mountain enclaves in the Serranía de Ronda (Andalusia, Spain). These include SAC Sierra Bermeja y Real; SAC Los Reales de Sierra Bermeja; SAC Sierra de las Nieves; SAC Sierra de Grazalema; SAC Sierra Blanca. A survivor of the postglacial retreat of the southernmost Mediterranean fir forests, this species is classified as endangered under Andalusian Law (Law 8/2003, of 28th October, on Wild Flora and Fauna).

Within its small distribution area, the Spanish fir is especially endangered in the ultramafic massif of Sierra Bermeja, where a centuries-long process of local extinctions has combined with a current alarming situation of isolation of its populations due to the fragmentation of its habitat. This jeopardizes the viability and gene exchange of this circum-Mediterranean fir species on serpentine soils (Arista, 1995; Pérez-Latorre et al., 2001; Linares et al., 2009; Linares, 2011; Guzmán et al., 2012; Olmedo-Cobo et al., 2017; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021). The main risk factors threatening *A. pinsapo* today are forest fires, the isolation of the populations and their monostructural characteristics, the alteration of their habitats, diseases associated with fungi and insects, and to a lesser extent, hybridization and atmospheric pollution (López-Quintanilla, 2013). These factors have partially halted the recovery that the species had been showing since the mid-20th century once the anthropic pressure (in the form of tree felling, charcoal making and overgrazing) on its ecological niches had subsided.

Although there have been significant advances in the paleo-biogeographical knowledge of this species in recent years, there is a lack of paleo-ecological analyses that complement the small number of palynological and pedoanthracological studies so far conducted in Spanish fir refuge areas (Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; Gómez-Zotano et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2017, 2021; Pardo-Martínez, 2020; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021; Pardo-Martínez et al., 2021).

These forests are essential for the ecological continuity of this species and remain exposed to real threats which have devastated these forests in the last centuries. With this premise, a series of hypotheses were established for this research:

- a) the existence in the past of more extensive, more continuous distribution areas of *A. pinsapo* in Sierra Bermeja based on evidence from historical sources, studies of its present-day habitats and species distribution models (SDMs).
- b) the deteriorated state of conservation of *A. pinsapo* in Sierra Bermeja is a sign that this species is on the point of local extinction and, consequently, must be treated as an endangered, highly unusual relict species.
- c) the ecological conditions of the micro-habitats where these conifers take refuge and the demographic characteristics of their populations make natural regeneration and expansion very difficult.

d) the recovery of these conifers seems possible through the establishment of a suitable strategy for their conservation based on the protection of their ecological niches, particularly reforestation.

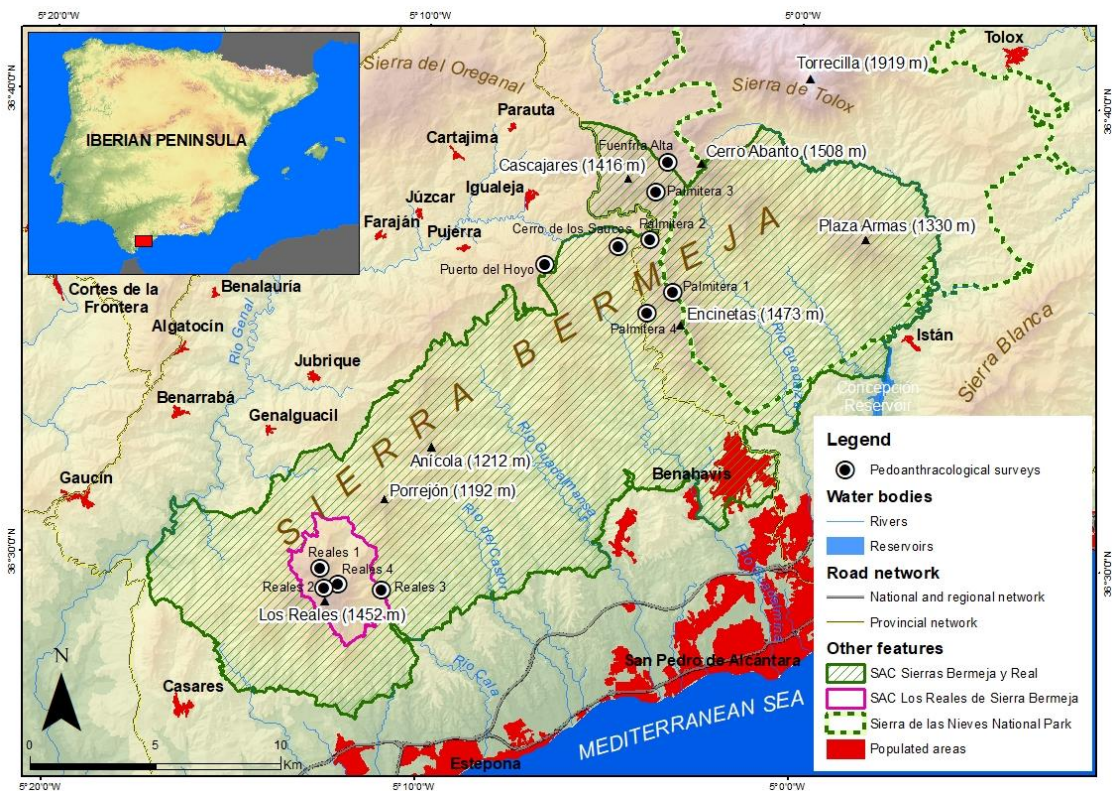
Bearing in mind these initial hypotheses and the conservation priorities of the SAC of forestry interest. This research aims to develop a proposal to improve the ecological and landscape quality and connectivity of the serpentine-soil Spanish fir forests of Sierra Bermeja based on past locations of *Abies* sp. discovered through pedoanthracological analysis (populations that have disappeared after being subject to recurrent fires throughout the Holocene). The data obtained enabled us to propose a solid model for an ecological corridor linking the Spanish fir forests. We also aim to transfer the results of this research to the relevant public administrations with powers to manage this emblematic forest resource to improve the ecological connectivity of the serpentine-soil Spanish fir forests of Sierra Bermeja.

11.2. Methodology

11.2.1. Study area

Sierra Bermeja is a mountainous area of the Serranía de Ronda, which acts as a hinterland of the Western Costa del Sol (province of Malaga). It is a medium-altitude coastal mountain range that reaches 1508 m a.s.l. (Cerro Abanto) Moreover, it is one of the most extensive ultramafic outcrops on the planet. The area is part of the Natura 2000 Network as SAC "Los Reales de Sierra Bermeja" and SAC "Sierras Bermeja y Real". They have an area of 1236 ha and 30 824 ha, respectively (Figure 21). The natural forest systems associated with peridotites are of particular importance, creating plant associations that form HCI 9520 (*Abies pinsapo* Spanish fir forests) and HCI 9540 (Mediterranean pine forests with endemic Mesogean pines). Protecting these habitats and ecological connectivity are the two main Conservation Priorities identified in the SACs' management plan and the reason for the declaration of Los Reales de Sierra Bermeja as a protected Natural Space in 1989. Of all these forest habitats, the HCI 9520 stands out in that it is classified in the Plan as very rare; the Spanish fir forests that grow on serpentine soils are a relict plant community that is unique in the world (Cabezudo et al., 1989; Gómez-Zotano et al., 2014; Pérez-Latorre & Hidalgo-Triana, 2017; Pérez-Latorre et al., 2020). Due to its high natural and cultural values, this area is part of the Andalusia (Spain) – Morocco Intercontinental Biosphere Reserve of the Mediterranean. Recently, the eastern half of Sierra Bermeja was included in the Sierra de las Nieves National Park.

Figure 21. Study area and location of the pedoanthracological samplings conducted during this research.



Source: own elaboration based on data from CNIG and IECA.

11.2.2. Method

The first phase of the method involves the analysis of all those earlier sources of information that enable us to estimate the past, present and potential future distribution bodies area of *A. pinsapo*, as represented above all in the studies by Gil (2002), Gómez-Zotano (2004), Becerra (2006), Guzmán et al. (2012), López-Quintanilla (2013) and Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo (2021), and and to characterize its habitat in geographical and phytogeographical terms.

The second phase of the method is based on pedoanthracological analysis. In this research, we followed the pedoanthracological protocols established by Talon et al. (1998) and adapted by Cunill et al. (2012). According to the basic information, 11 pedological samplings were conducted in areas considered potential hosts of serpentine-soil Spanish fir forests in Sierra Bermeja (Figure 21). Between one and eight sampling levels were identified in each site. These were partly delimited using soil horizons, and between 3 and 15 kg of soil were collected for each level. The samples were then processed in the laboratory using the water-sieving technique (mesh sizes of 5, 2 and 0.8 mm) (Figure 22). Later, once the mineral fraction collected in the meshes during the sieving process had dried, we conducted manual triage of the charcoal it contained with the help of a binocular magnifying glass. After calculating the absolute anthracomass (mg of charcoal/kg of mineral residue) for each sampling level, we then conducted a detailed study of the three anatomical sections of the wood (transversal, longitudinal radial and longitudinal tangential) using an incident light episcopic microscope

(differential interference contrast of 50x, 100x, 200x and 500x). The next stage was to try to identify the taxa of the charcoal samples we had collected using the wood anatomy identification keys provided by Schweingruber (1990) and Vernet et al. (2001), and by comparing them with the charcoal samples from the reference collection at the anthracothèque at the Terra Laboratory at the University of Granada. A total of 3565 fragments were analyzed, of which 28 were sent for C¹⁴ AMS radiometric dating at two specialized laboratories: Poznań Radiocarbon Laboratory (Poznań, Poland) and Alfred-Wegener-Institut (Bremerhaven, Germany). They were then calibrated with Oxcal v. 4.4 using the IntCal20 database (Reimer et al., 2020), to 2 sigma (95 % probability). Figure 22 shows some of the tasks conducted during this second phase of the pedoanthracological method.

This method's third and final phase involved designing and mapping a proposal for the ecological connectivity of *A. pinsapo* based on the results of the previous two phases.

Figure 22. Photographs illustrating the pedoanthracological method applied at the "Palmitera 1" site: a) Carrying out the sampling; b) Preparing the edaphological profile; c) Charcoal sample; d) Sieving; e) Selected charcoal fragments.



Source: José Gómez Zotano.

11.3. Results

11.3.1. Analysis of the information sources

Few diachronic studies have been conducted to reconstruct the evolution of the Spanish fir forest in Sierra Bermeja over time. The most interesting for these purposes is the historical data set out in Gómez-Zotano (2004), Guzmán et al. (2012), Junta de Andalucía (2012) and Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo (2021). These studies highlighted increased fragmentation of Spanish fir habitats and a decline in its surface area since the 18th century, most specifically in the Spanish fir forests in Los Reales, Abanto, Armas and Corona. They also confirmed the extinction of other smaller forest formations in Trinchuelas, Duque and Cerro del Pollo. The main risk factors that have endangered populations of *A. pinsapo* in the recent past are forest fires (especially the ones in 1991 and 2021), the isolation of the populations and their monostructural characteristics, the modification of their habitats, the diseases associated with fungi and insects, and to a lesser extent hybridization and atmospheric pollution (López-Quintanilla, 2013). These factors have helped halt, at least in part, the expected recovery since the mid-20th century, once the anthropic pressure on its ecological niches (tree felling, traditional charcoal production and overgrazing) had declined.

Regarding the research into this species habitats and ecological niches, the phytogeographic studies by Gómez-Zotano et al. (2017) and Pérez-Latorre & Hidalgo-Triana (2017) are especially interesting. These studies described the singularity of the vegetation in the bermejense sector (biogeographical territory of Sierra Bermeja). At a broader scale, Liétor et al. (2003) analyzed the causal relations established between the characterization of the edaphic medium and the availability of the macro- and micro-nutrients required for the development of *A. pinsapo*. Torres-Cabañete et al. (2009) centred their research on the flows of the nutrients of the Spanish fir forest, concluding that the structural modifications of the microbial community present in the soils inhabited by *A. pinsapo* depended on the biogeochemical variability between the different types of Spanish fir forests. Other research studies, such as those carried out by Carreira de la Fuente et al. (2013) and Lázaro-Gimeno et al. (2013), respectively, analyzed the effects of atmospheric pollution and of tropospheric ozone on Spanish fir populations. The phytosanitary state of the forest masses of this species was explored by Cobos-Suárez et al. (2013), who concluded that the population density and state of conservation of the serpentine-soil Spanish fir forest varied considerably from one place to another.

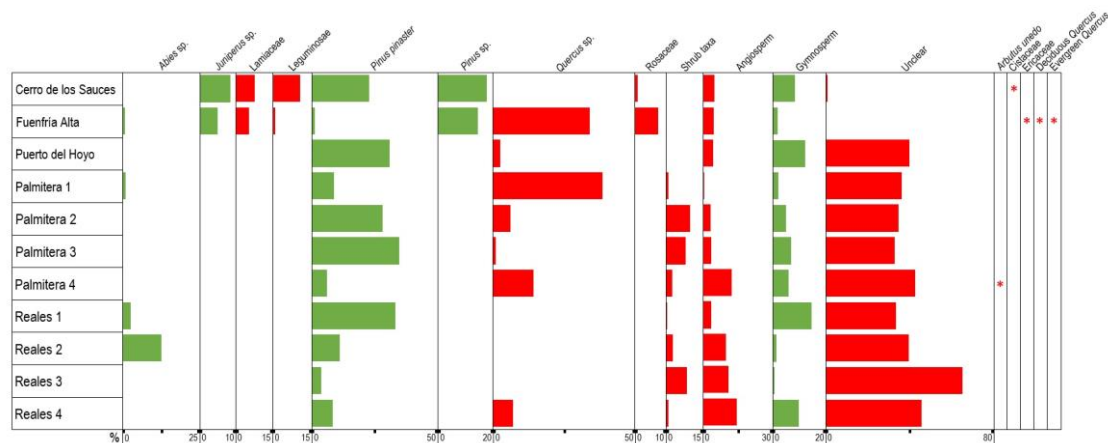
For their part, the main SDMs applied to *A. pinsapo* (Gonzalo et al., 2004; Navarro et al., 2006; Alba-Sánchez et al., 2010; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; López-Tirado & Hidalgo, 2014; Gutiérrez-Hernández et al., 2017; Gutiérrez-Hernández, 2018) have been based on suitability patterns and multivariable regressions for establishing different degrees of the potentiality of this species in the mountains in the South and Southeast of Spain. As regards Sierra Bermeja, these models indicate a high number of habitable areas for the Spanish fir in almost all its

territory above 800-1000 m a.s.l., covering all the mountain ridges that link the present-day Spanish fir forests that have taken refuge in the peripheral peaks of the massif. From a prospective point of view, the models applied by the Regional Government of Andalusia are of particular interest (Junta de Andalucía, 2014). These models show a significant reduction in the habitat suitability area of the Spanish fir at the end of the current century. In this way, the high levels of suitability manifested in previous years are now giving way to medium and low values, so revealing how climate change is ushering in an uncertain future for the survival of this species (Lenoir & Svenning 2014; González-Hernández, 2021).

11.3.2. Pedaanthracological analysis

In this study, we analyzed 3565 charcoal fragments (Figure 23), of which 2341 (62.8 %) were correctly identified. The remaining 1224 fragments (34.3 %) were impossible to identify. The most frequent causes preventing us from identifying the taxa of these fragments included vitrification processes, the deformation of the anatomical structure of the wood and/or the presence of fungi.

Figure 23. Taxonomic identifications in each of the sampling sites in Sierra Bermeja.



Source: own elaboration.

We identified up to 144 *Abies* fragments in 4 of the 11 sites sampled. Palmitera 1 and Fuenfría Alta were considered to be *Abies* paleo-populations, as in both sites this genus is not present today. The specific anthracomasses were relatively small, with values varying between 233.6 mg/kg in Palmitera 1, 37.5 mg/kg in Reales 2, 9.8 mg/kg in Fuenfría Alta and 8.4 mg/kg in Reales 1.

The most frequently identified taxon in the pedaanthracological record was *P. pinaster* with 765 charcoal fragments (21.5 % of the total). Its specific anthracomass values ranged between 14 295.2 mg/kg for Palmitera 1 and 7.3 mg/kg for Palmitera 4.

The second most common genus was *Quercus* with 679 fragments identified (19 % of the total). This genus was found in seven out of the 11 samplings conducted. The anthracomass values varied between 63 601.5 mg/kg in Palmitera 1 and 8.4 mg/kg in Reales 4.

The pedoanthracological record was completed by families and genera such as *Pinus* (1.3 %), Lamiaceae (0.7 %), *Juniperus* (0.5 %), Leguminosae (0.5 %), Rosaceae (0.4 %), evergreen *Quercus* (0.3 %), deciduous *Quercus* (0.2 %), Ericaceae (0.2 %) and Cistaceae (0.1 %).

Regarding radiocarbon dating, 28 fragments of *Abies* were dated, obtaining chronologies ranging between 9931-9616 years cal BP and 282-82 years cal BP (Table 9).

Table 9. Chronologies obtained by radiocarbon dating for samples of *Abies* sp.

Site	Laboratory code	Conventional age (C ¹⁴ years BP)	Calibrated age (years cal BP) (95 %)
Palmitera 1	5173.1.1	8707 ± 37	9931-9616
	5174.1.1	8573 ± 35	9719-9551
	5176.1.1	8549 ± 36	9552
	5175.1.1	8300 ± 40	9266-9206
	5177.1.1	8155 ± 39	9245-9076
	5170.1.1	8003 ± 128	9236-8615
	5171.1.1	8057 ± 111	8672
	Poz-83921	7300 ± 50	8342-8053
	5169.1.1	7142 ± 34	8001-7944
	Poz-78851	6480 ± 40	7516-7356
	5172.1.1	6239 ± 35	7224-7085
	Poz-78852	5710 ± 40	6651-6473
	Poz-83920	5840 ± 40	6607-6573
	Poz-83922	5770 ± 40	6553-6523
Poz-83924	4605 ± 35	5441-5145	
Reales 1	Poz-83919	8860 ± 50	9810
	Poz-83918	6160 ± 40	7014
	Poz-78858	200 ± 30	326-208
	Poz-78859	195 ± 30	325-143
	Poz-78885	60 ± 30	294-102
Reales 2	Poz-82525	3270 ± 30	3516-3476
	Poz-82527	1800 ± 30	1832-1674
	Poz-83914	45 ± 30	295-103
	Poz-83913	40 ± 30	295-103
	Poz-83912	110 ± 30	282-82
Fuenfría Alta	Poz-113780	8740 ± 50	9619
	Poz-113779	4970 ± 35	5897-5668
	Poz-113778	5015 ± 35	5726-5679

Source: own elaboration.

11.3.3. Proposal for the connectivity

Following the results of the pedoanthracological analysis and the previous information analyzed, we propose setting up an ecological corridor for the Spanish fir forests that grow on serpentine soils to create a continuous habitat connecting its two core areas (Figures 24, 25 and 26). Core Area A is at the western end and hosts the largest Spanish fir forest, located on the peak known

as Los Reales (1452 m a.s.l.). For its part, Core Area B, at the Eastern end, is made up of the little Spanish fir forest in the Plaza de Armas (1330 m a.s.l.). Between the two, an isoaltitudinal ridge runs parallel to the coast from which various peaks of over 1000 m a.s.l. jut out (these include, from southwest to northeast, Porrejón 1192 m a.s.l., Anícola 1212 m a.s.l., Canalizo 1166 m a.s.l., Caballo 1092 m a.s.l., Sauces 1157 m a.s.l.). This ridge occupies the western half of the massif. In its eastern half, various peaks reach higher altitudes than Sierra Bermeja, namely Sierra Palmitera (Encinetas 1473 m a.s.l.), Cerro del Duque (1342 m a.s.l.), Cerro Abanto (1508 m a.s.l.) and Cerro Corona (1299 m a.s.l.). In the first of these enclaves, charcoal fragments from paleo-populations of Spanish fir were found, while in the others, there are a few surviving remains of Spanish fir forests (individual trees and small copses), most of which were seriously damaged by the big fire of 1991.

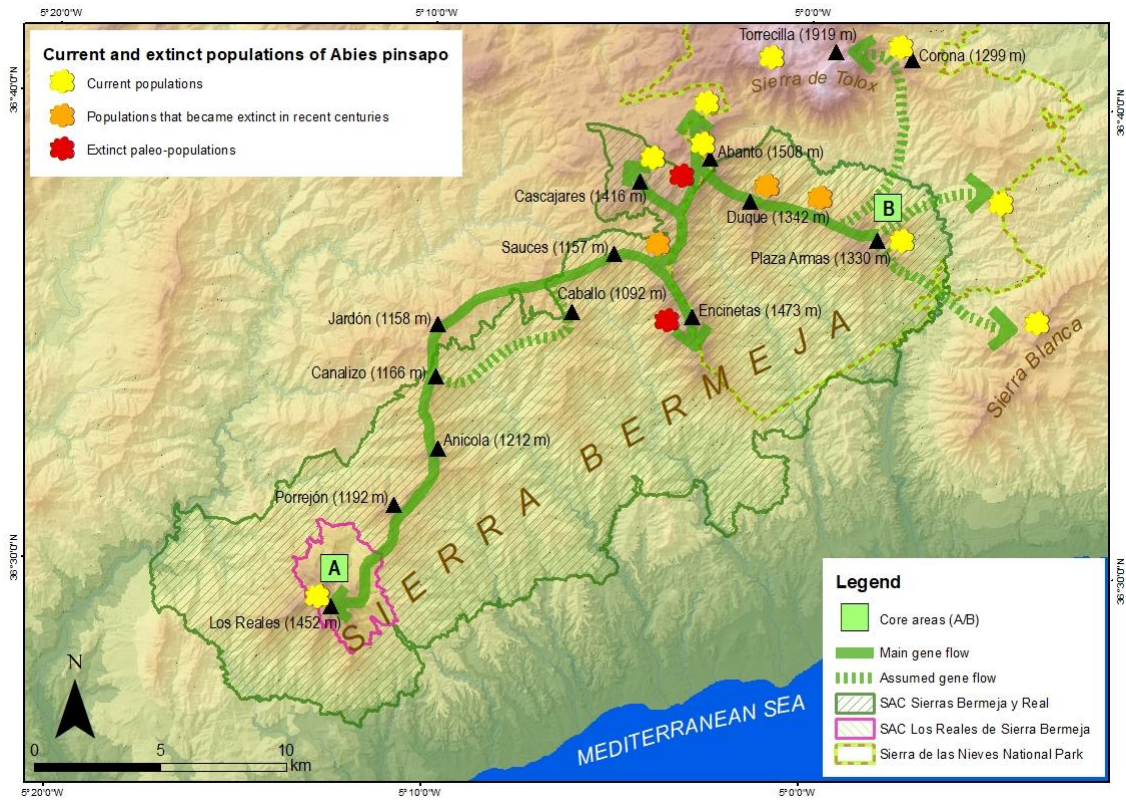
Figure 24. Core areas for the serpentine-soil Spanish fir corridor (A, Los Reales; B, Plaza de Armas).



Source: José Gómez Zotano.

Overall, the ridge forming the backbone of Sierra Bermeja shows a high level of ecological homogeneity: serpentine soils, humid-hyperhumid ombrotype, non-rainfall water inputs and a meso-supramediterranean bioclimatic stage (the latter at altitudes of over 1200-1400 m a.s.l.). This mesological continuity is only interrupted at the headwaters of the River Guadalmanza, where metamorphic materials (gneisses and schists) appear along about 6 km of the drainage divide. Aside from the lithological differences, the cold temperatures and humidity are also important factors as the ridge continues at altitudes of over 1000 m a.s.l. (Cerro Jardón, 1158 m a.s.l.). This sector, which belongs to the SAC Valle del Genal, was excluded from the SAC Sierra Bermeja y Real because it hosts plantations of sweet chestnut (*Castanea sativa*) and Monterey pine (*Pinus radiata*).

Figure 25. Map of the corridor for the serpentine-soil Spanish fir and its main gene flow.



Source: own elaboration based on data from CNIG and IECA.

Figure 26. Ridge of Sierra Bermeja which would form part of the ecological corridor of the serpentine-soil Spanish fir forest.



Source: José Gómez Zotano.

The ridge forming the ecological corridor has a minimum length of 36 km, interrupted only by narrow mountain passes such as Peñas Blancas (972 m a.s.l.), Chaparral (932 m a.s.l.), Hoyo (963 m a.s.l.), Allnadillas (1065 m a.s.l.) and Refriega (916 m a.s.l.), which act as minor natural barriers to gene exchange (passage of individuals, seeds, pollen, spores, etc.), without this creating an obstacle for the future viability of the naturally disjointed populations. No remains of *Abies* sp. were identified in the pedoanthracological sampling conducted in Puerto del Hoyo.

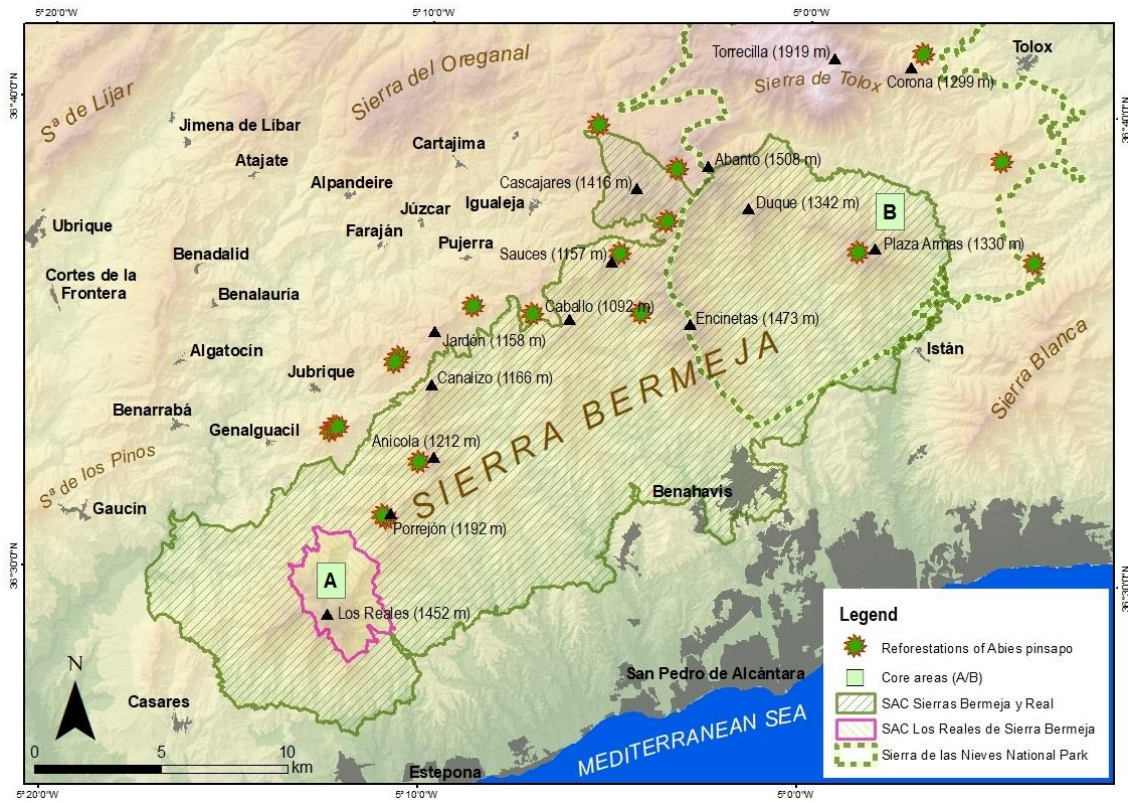
The ecological corridor has clear, well-defined boundaries to the northwest (Genal Valley) and south (Mediterranean coast). In the East and Northeast, there might be exchanges with Spanish fir populations that grow on carbonated and schistose soils in Sierra Blanca de Marbella, Bornoque and Sierra de las Nieves, included in the SAC. In addition, the extension of the corridor towards Sierra Blanca de Igualeja (Cascajares, 1416 m a.s.l.) in the north is necessary to connect the isolated Spanish fir forests in this marble-stone mountain, which also belongs to the SAC Sierra Bermeja y Real.

11.3.4. Reforestation activities

The transfer of the results of this research to the Public Administrations and to private actors with competencies in this field has enabled us to implement the proposal for a network of ecological corridors of *A. pinsapo*, which connect their fragmented populations in Sierra Bermeja. Using the pedoanthracological data, in combination with SDMs (Navarro et al., 2006), the species has been reintroduced in 15 localities where it no longer grew, through the Plan for the Recovery of the Spanish fir being implemented by the Department of Agriculture, Livestock-Farming, Fishing and Sustainable Development of the Regional Government of Andalusia (Figure 27).

The reforestation activities involved a combination of seeding (7200 seeds planted in the shaded areas of Jubrique, Pujerra and Igualeja from the end of 2020 to January 2021) and direct plantation from 2019 of 1094 plants with 3 to 7 internodes in publicly-owned mountainsides (880 plants from Core Area A between Jubrique and Igualeja and 214 from Core Area B in the Sierra Real de Istán), and 13 to 15 internodes in private estates. In the latter, which made up 2 of the 15 localities, the work was carried out with the active collaboration of the Asociación El Glaucal de La Nava and an extensive volunteer network. Projects of particular interest include planting Spanish firs in the Venta del Madroño and the project known as "Bosque Eterno" or Eternal Forest involving sponsoring Spanish firs (Figure 28). All these actions have brought about a significant improvement in the local environment, given the minimal territorial representation of *A. pinsapo*, the threats to which it is exposed and the ecological requirements which have led to it being classified as an endemic species with a very closely confined distribution area.

Figure 27. Localities in which *A. pinsapo* has been reintroduced.



Source: own elaboration based on data from CNIG and IECA.

Figure 28. a) Seeding work in the publicly-owned mountainside of Sierra Bermeja de Igualaja; b) Seeds classified according to the Spanish fir forest of origin; c and d) Private Spanish fir plantation project in the Venta del Madroño; e and f) Reforestation activities for the creation of the Bosque Eterno (Eternal Forest)



Source: José Gómez Zotano.

11.4. Discussion

11.4.1. Paleo-ecological bases

The application of the pedoanthracological method in different locations of Sierra Bermeja has enabled us to propose a model of ecological connectivity based on the following paleo-ecological aspects: (1) Enhanced knowledge of the present and potential future distribution of *A. pinsapo* in Sierra Bermeja; (2) The confirmation through the analysis of the soil charcoal uncovered in the samplings that *A. pinsapo* once had a larger distribution area in Sierra Bermeja; (3) A more precise knowledge of the dynamics of the Spanish fir forests after the Last Glacial Maximum, the causes that led to its local extinction and the consequent shrinking of its past distribution area to its current one; (4) The assessment of the role played by climate and of the autochthonous nature of the conifer forest during the Holocene in Sierra Bermeja; (5) The verification of the critical role played by fire in the configuration of the plant landscape during the last millennia in this area; (6) The confirmation using charcoal fossil records of the veracity of the historic sources and of the SDMs.

The identification of various fragments belonging to the *Abies* genus (presumably *A. pinsapo*) in Palmitera 1 and Fuenfría Alta, localities where this genus is no longer present today, enabled us to confirm that the Spanish fir once covered a much larger area. This idea, first raised by Linares (2011), was later reinforced by the findings of different paleo-pollen records from the Holocene in various different locations of the South and East of the Iberian Peninsula (see Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; Alba-Sánchez et al., 2018), although the very limited representation of this taxon in the pollen diagrams did not enable this claim to be verified with a sufficient degree of certainty (see Carrión, 2013). This hypothesis was later ratified by the discovery of up to 4 extinct populations of *Abies* in the Serranía de Ronda as a whole (Palmitera 1, Fuenfría Alta, Jarastepar 2 and Arroyo de los Lobos 2), after the application of pedoanthracological analysis (Olmedo-Cobo et al., 2021; Pardo-Martínez et al., 2021), a paleo-ecological discipline with a high spatial resolution which verifies the local presence of the identified taxa (Talon et al., 1998; Cunill et al., 2012).

In general, our findings reveal the important role played by Sierra Bermeja as a postglacial refuge for different species of conifers (such as *A. pinsapo* and *P. pinaster*) after the Last Glacial Maximum. This discovery enabled us to fill an important gap in our knowledge of the southern part of the Iberian Peninsula. This is because, until relatively recently, a large percentage of the paleo-ecological studies carried out in this region focused on the Southeast (see Carrión et al., 2007; Gil-Romera et al., 2010; Anderson et al., 2011), or coastal areas and/or areas at relatively low altitude in the Southwest of the Iberian Peninsula (see Carrión, 2013). Besides, the bermejense sector and the Serranía de Ronda as a whole form an interesting biogeographical crossroads (Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021), which gives it a great variety of climatic and historic singularities –within its regional context– all of which make it a unique space from a paleo-biogeographical point of view (Gómez-Zotano, 2004). The data

obtained have also confirmed that both species make up the climax vegetation in Sierra Bermeja, so revealing that *P. pinaster* is an autochthonous species on ultramafic soils, thus bringing to an end a debate that had long divided the scientific community (Olmedo-Cobo et al., 2019).

On the one hand, the radiocarbon dating of 28 charcoal fragments belonging to the *Abies* genus has made it possible to theorize about the dynamics of the Spanish fir in the bermejense sector after the Last Glacial Maximum; and on the other, these data confirm the critical role played by fire in the configuration of the plant landscape of Sierra Bermeja, and how for thousands of years fire has been one of the leading causes of local extinction of *A. pinsapo* in areas where this fir no longer grows. The Spanish fir forest in Sierra Bermeja was affected by up to 5 episodes of fire in the first stages of the Holocene, with chronologies dating from 9931-9616 to 9552 years cal BP. This time interval coincided with a period of maximum heat and dryness around the Alboran Sea approximately 9500 years ago (Jalut et al., 2000; Cacho et al., 2001), which, together with the still limited representation in the paleo-pollen diagrams of agricultural practices in locations near the study area (Aura et al., 2002; López-Sáez et al., 2007; Cortés-Sánchez et al., 2008; Jordá & Aura, 2008), suggests that natural factors caused these perturbations. It seems likely that these episodes of fire became more intense during the mid-Holocene, coinciding with a period in which there is evidence of an increase in the prehistoric population –and of associated agricultural and livestock farming activity– in areas near the coast of Andalusia and the Ronda Depression (Fernández et al., 2007; Ramos-Muñoz et al., 2017; Castaño-Aguilar, 2021). The aridity of the Mediterranean climate was also increasing at that time (Jalut et al., 2000). This dynamic, which can be viewed within the context of the progressive aridification of the environment, may have favoured the conifers that best adapted to xeric conditions such as *P. pinaster*. The decline of *A. pinsapo* continued until about 5500 years ago when it disappeared from the pediaanthracological record in Palmitera 1 and Fuenfría Alta. This finding, together with the progressive decline in *Abies* pollen in most of the fossil records from the south of the Iberian Peninsula over the last few thousand years (Carrión, 2013), could help explain the extinction of the Spanish fir in these two localities in Sierra Bermeja.

At a nearer timescale, the statistics on forest fires show that they have affected a larger area and have been especially devastating in recent decades (Stephen et al., 2013). In Spain, the risk factors that give rise to forest fires have increased in recent years, although the number of fires, many of which are started deliberately, has fallen in most Spanish provinces (Urbieta et al., 2019). Unfortunately, Sierra Bermeja is not following this positive trend and is currently one of the areas of the Iberian Peninsula most affected by fire (MITECO, 2022), with 46 227 ha burnt since 1950 (Martos-Martín & Gómez-Zotano, 2021). Five major forest fires have affected the serpentine-soil Spanish firs since the 1950s (1956, 1966, 1969, 1991 and 2021), causing the loss of ±4494 trees. The last of these fire episodes was the most devastating, affecting almost 10 000 ha and destroying ±3000 *A. pinsapo* trees. Forest fires cause severe damage in terms of the direct disappearance of thousands of individual trees and the destruction of

potential habitat areas for the natural dispersion of this species, with the resulting negative effects on connectivity (Martín-Martín et al., 2013).

11.4.2. Connectivity

The results of the historical and pedoanthracological analyses verified the existence of historic and paleo-populations of *A. pinsapo* in four enclaves in S. Bermeja. The secondary-succession scrub typical of the serpentine-soil forests of *A. pinsapo* can also be found in these ecological niches (Gómez-Zotano et al., 2014). These findings show that these areas have the right ecological conditions to establish an ecological corridor that would facilitate the regeneration of existing Spanish fir forests and the links between them. To this end, within the framework of the Natura 2000 Network, it is necessary to implement both a more ambitious strategy for the protection/regeneration of the ecological conditions of these habitats –including those where the species currently finds refuge–, and a plan for the reforestation of the species given the demographic characteristics of its populations, which typically have a limited capacity for natural regeneration and expansion. To date, the various actions taken to restore and recover the Spanish fir forest have been based on historical sources, studies of the present-day habitats and SDMs, which are not free of uncertainties and inaccuracies. The pedoanthracological approach provides much more accurate answers to the unknowns that inevitably arise in theoretical modelling.

In this sense, the restoration of ecosystems of this kind, understood as a set of activities aimed at re-establishing the functionality and the capacity of ecosystems to develop towards a mature state (Law 42/2007 - State Agency, Official State Gazette, 2007), must guarantee the maintenance and improvement of connectivity so as to ensure the conservation of these ecosystems in a profoundly disturbed territory (basically by forest fires) faced with the threat of Climate Change, which will bring about an increase in temperatures and a decline in rainfall.

This connectivity would bring about the recovery of forests that have been affected by fire for millennia and would improve the habitats that sustain the Spanish fir as an endangered emblematic species. The ecological corridor for the Spanish fir in Sierra Bermeja would reduce the isolation of the different local populations and promote gene exchange, enhancing genetic variability. At the same time, it would prevent phenomena such as endogamy and genetic drift. It would also help the small populations in decline, halting trends towards local extinction. In addition, it would enable the recolonization of habitats, the re-establishment of populations after episodes of local extinction, and the maintenance of greater richness and diversity of native species. Finally, it would provide a habitat, a refuge and other necessary resources for numerous forest species.

With these results, it will also be possible to complement and expand the "Green Corridor for the Spanish Fir" proposed by Gavira (2006), which was designed to connect the calcicole Spanish Fir forests in the Sierra de las Nieves National Park with those in the Sierra de Grazalema Natural Park. In addition, Sierra Bermeja could also become a wider ecological

corridor for other plant and animal species. The connectivity study for the development of flora, some of which is endemic and exclusive to Sierra Bermeja, is also of great interest (Gómez-Zotano et al., 2014). For example, according to Pérez-Latorre & Hidalgo-Triana (2017), three species of endemic serpentinophyte flora are present exclusively in Core Area A of Los Reales (*Peucedanum officinale* subsp. *brachyradium*, *Centaurea lainzii* and *Euphorbia flavicoma* subsp. *bermejense*), which could benefit from the ecological corridor. In general, Sierra Bermeja, as an essential refuge area for flora and one of the most important speciation areas for Mediterranean vegetation in typological, landscape and physiographical terms (Cabezudo et al., 1989; Gómez-Zotano, 2004), could therefore be considered an ecological corridor of utmost importance.

This proposal for ecological connectivity would enable compliance with one of the legal requirements established by the Habitats Directive, i.e. the preservation of the ecological connectivity and integrity of the natural areas included in the Natura 2000 Network (García-Quiroga & Abad-Soria, 2014). It would also allow certain endangered species of flora, such as the Spanish fir, to consolidate and expand their distribution areas. This is an essential prerequisite for complying with one of the fundamental principles of the biogeographic conservation theory, namely that protected areas must have the greatest possible surface area to improve their interconnection (Worboys et al., 2010). All this is within a context in which habitat fragmentation is one of the main causes of worldwide biodiversity loss (Farjalla et al., 2018). This explains why guaranteeing gene exchange between the different populations of the species concerned has been a common task in the defence of biodiversity conservation for decades. Within this context, implementing ecological corridors has proved the most effective option for restoration work and improving the connections between vegetal organisms (Bennet, 2004; Morera et al., 2021).

The lack of validation procedures with accessible data can inhibit evaluation of the effectiveness of ecological corridors (Lalechère & Bergès, 2021). However, a wide array of experiences in different parts of the world, with representation of all kinds of ecosystems (see Hilty et al., 2020), endorse the positive effects of these mechanisms in the management of biodiversity, especially when compared to other methods, such as assisted migration (Gurrutxaga & Lozano-Valencia, 2008; Krosby et al., 2010; Morera et al., 2021). Most of the species involved respond positively to initiatives of this kind (Gilbert-Norton et al., 2010), which have proved especially effective in the case of vulnerable species such as *A. pinsapo*, with a low dispersal capacity (Merenlender et al., 2022), something that should be monitored periodically (Rudnick et al., 2012). It is also important to incorporate human activities when planning corridors of this kind, especially in a context in which the study of ecological processes must necessarily go beyond the traditional ecosystem level and be addressed from a holistic approach to landscape (Martín-Martín et al., 2013).

In order to guarantee the successful fulfilment of these objectives, authors such as Hodgson et al. (2009) and Krosby et al. (2010) argue that it is essential to increase the number of protected

areas in both quantitative and qualitative terms. In this sense, the inclusion of Sierra Bermeja as a whole within the recently declared Sierra de las Nieves National Park should be viewed as a priority, especially if we take into account that National Parks are generally equipped with greater public resources to prevent and fight forest fires, the main threat to which the Spanish fir is exposed (Rodríguez-Rodríguez & Martínez-Vega 2017). This would bestow a higher degree of protection on the only Spanish fir forest on peridotites in the world, which, combined with reinforcing environmental education and awareness in a heavily populated area, would guarantee real progress in safeguarding ecological and landscape values that are unique in the world.

11.5. Conclusions

The location of paleopopulations and past distribution areas provides a significant advance on the current state of scientific knowledge for the conservation and sustainability of *Abies pinsapo*, as a basis for the ecological and socio-cultural coherence of its populations in the south of the Iberian Peninsula and as a model for sustainable human development. By transferring this knowledge to the relevant authorities and the wider general public, this project aspires to contribute to the safeguarding of the Spanish fir, a symbolic tree that provides valuable ecosystem services and enhances the wellbeing of the societies that live in its vicinity.

The results of this research could be of interest to environmental volunteer networks and local companies working in the forestry sector, who could apply the pedoantracological methodology in their research. It could also help solve various technical problems arising in forest restoration and treatment (reconversion of reforestations to native masses of Spanish fir, broadleaved, pine forest, mixed masses, etc.). The results obtained could also help resolve other issues related to the processes that take place within the biota, the ecological function of biodiversity (co-evolutionary mechanisms, connectivity or isolation of species) or the identification of new present or past populations.

In this sense, it is worth highlighting the possibilities offered by this project for the application of the principle of ecological connectivity contained in Law 42/2007 of 13th December on Natural Heritage and Biodiversity: Article 20 of Title I "Ecological corridors and mountain areas" states that "Public Administrations shall provide, in their environmental planning or in the natural resource management plans, mechanisms to achieve the ecological connectivity of the territory, establishing or re-establishing corridors, in particular within the protected areas of the Natura 2000 Network and the natural areas of special importance for biodiversity". This objective is also included in the Management Plans of the Special Areas of Conservation (SAC) declared due to the importance of the Natural Habitats of Community Interest Type 9520 "*Abies pinsapo* forests" (a habitat listed as very rare in the case of serpentine fir forests); these plans emphasize the ecological connectivity of both the species and its forests.

References

- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Benito, B., Linares, J.C., Nieto-Lugilde, D. et al. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: a phylogeographic approach using fossil pollen data and species distribution models. *Diversity and Distribution* 16(2), 214–228. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00636.x>
- Alba-Sánchez, F. & López-Sáez, J.A. (2013). Paleobiogeografía del pinsapo en la Península Ibérica durante el Cuaternario. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 33–52). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Alba-Sánchez, F., Abel-Schaad, D., López-Sáez, J.A., Sabariego Ruiz, S., Pérez-Díaz, S. & González-Hernández, A. (2018). Paleobiogeografía de *Abies* spp. y *Cedrus atlantica* en el Mediterráneo occidental (península ibérica y Marruecos). *Ecosistemas*, 27(1), 26–37. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1441>
- Anderson, R.S., Jiménez-Moreno, G., Carrión, J.S. & Pérez-Martínez, C. (2011). Postglacial history of alpine vegetation, fire, and climate from Laguna de Río Seco, Sierra Nevada, southern Spain. *Quaternary Science Reviews*, 30, 1615–1629. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.03.005>
- Arista, M. (1995). The structure and dynamics of an *Abies pinsapo* forest in southern Spain. *Forest Ecology and Management*, 74(1-3), 81–89. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03507-S](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03507-S)
- Aura, J.E., Jordá, J.F., Pérez, M., Rodrigo, M.J., Badal, E. et al. (2002). The far south: The Pleistocene–Holocene transition in Nerja Cave (Andalucía, Spain). *Quaternary International*, 93, 19–30. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00004-6)
- Becerra, M. (2006). *Ordenación y aprovechamiento de los pinsapares rondeños durante el siglo XIX. La memoria de Antonio Laýnez*. Editorial La Serranía.
- Becker, A., Körner, C., Brun, J.J., Guisan, A. & Tappeiner, U. (2007). Ecological and land use studies along elevational gradients. *Mountain Research and Development*, 27(1), 58–65. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2007\)27\[58:EALUSA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2007)27[58:EALUSA]2.0.CO;2)
- Bennett, G. (2004). *Linkages in Practice: A Review of Their Conservation Practice*. IUCN.
- Brambilla, M., Bergero, V., Bassi, E. & Falco, R. (2015). Current and future effectiveness of Natura 2000 network in the central Alps for the conservation of mountain forest owl species in a warming climate. *European Journal of Wildlife Research*, 61, 35–44. <https://doi.org/10.1007/s10344-014-0864-6>
- Cabezudo, B., Nieto, J.M. & Pérez-Latorre, A. (1989). Contribución al conocimiento de la vegetación edafófilo-serpentinícola del sector Rondeño (Málaga, España). *Acta Botánica Malacitana*, 14, 291–294.

- Cacho, I., Grimalt, J., Canals, M., Sbaiffi, L., Shackleton, N.J. et al. (2001). Variability of the western Mediterranean Sea surface temperature during the last 25,000 years and its connection with the Northern Hemisphere climatic changes. *Paleoceanography*, 16, 40–52. <https://doi.org/10.1029/2000PA000502>
- Carreira de la Fuente, J.A., Salido, M.T., Torres-Cabañete, P., Blanes-Campos, C., Viñepla, B. et al. (2013). Efectos de la contaminación atmosférica en los Pinsapares de Andalucía. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 375–387). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Carrión, J.S. (2013). *Paleoflora y Paleovegetación de la Península Ibérica e Islas Baleares: Plioceno-Cuaternario*. Ministerio de Economía y Competitividad, Universidad de Murcia y Fundación Séneca.
- Carrión, J.S., Fuentes, N., González-Sampériz, P., Quirante, L.S., Finlayson, J.C. et al. (2007). Holocene environmental change in a montane region of southern Europe with a long history of human settlement. *Quaternary Science Reviews*, 26(11-12), 1455–1475. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.03.013>
- Castaño-Aguilar, J.M. (2021). Poblamiento antiguo en los bosques de la Serranía de Ronda. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 59–75). Editorial La Serranía.
- Catalan, J., Ninot, J.M. & Aniz, M.M. (2017). *High Mountain Conservation in a Changing World*. Springer Nature.
- Cobos-Suárez, P., Martínez-Saavedra, G., Gutiérrez-Tejada, G.A., Miguel-Martínez, F.J. & Cobos-Suárez, J.A. (2013). Estado fitosanitario de las masas de *Abies pinsapo* Boiss. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 415–441). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Cortés-Sánchez, M., Morales-Muñiz, A., Simón-Vallejo, M.D., Bergadà-Zapata, M.M., Delgado-Huertas, A. et al. (2008). Palaeoenvironmental and cultural dynamics of the coast of Málaga (Andalusia, Spain) during the Upper Pleistocene and early Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 27, 2176–2193. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.03.010>
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C, Pèlachs, A. & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(4–5), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00334-011-0342-y>
- Farjalla, V., Coutinho, R., Gómez-Aparicio, L., Navarrete, S., Aliny, P.F. et al. (2018). Pérdida de biodiversidad: causas y consecuencias para la humanidad. *Cambio Global. Una Mirada desde Iberoamérica*, 89–110.

- Fernández, L.E., Suárez, J., Tomassetti, J.M. & Navarro, I. (2007). Corominas, una necrópolis megalítica en el ámbito litoral malagueño. *Mainake*, 29, 513–540
- Gavira, O. (2006). Análisis de un corredor florístico entre los Parques Naturales Sierra de Grazalema y Sierra de las Nieves (Cádiz y Málaga, España). *Anales de Biología*, 28, 45–72.
- García-Quiroga, F. & Abad-Soria, J. (2014). Los corredores ecológicos y su importancia ambiental. *Observatorio medioambiental*, 17, 253–298. https://doi.org/10.5209/rev_OBMD.2014.v17.47194
- Gil, A. (2002). *Simón de Rojas Clemente. Viaje a Andalucía. Historia Natural del Reino de Granada*. GBG Editora.
- Gil-Romera, G., Carrión, J.S., Pausas, J.G., Sevilla-Vallejo, M., Lamb, H.F. et al. (2010). Holocene fire activity and vegetation response in South-Eastern Iberia. *Quaternary Science Reviews*, 29(9-10), 1082–1092. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.01.006>
- Gilbert-Norton, L., Wilson, R., Stevens, J.R. & Beard, K.H. (2010). A Meta-Analytic Review of Corridor Effectiveness. *Conservation Biology*, 24(3), 660–668. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01450.x>
- Gómez-Zotano (2004). *El papel de los espacios montañosos como traspais del litoral mediterráneo andaluz, el caso de Sierra Bermeja (provincia de Málaga)* (Tesis Doctoral). Universidad de Granada.
- Gómez-Zotano, J., Román-Requena, F., Hidalgo-Triana, N. & Pérez-Latorre, A.V. (2014). Biodiversidad y valores de conservación de los ecosistemas serpentínicos en España: Sierra Bermeja (provincia de Málaga). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 65, 187–206. <https://doi.org/10.21138/bage.1749>
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Martínez-Ibarra, E. (2017). Descubrimiento y caracterización geográfica de una depresión ultramáfica en Sierra Bermeja: nuevos datos geomorfoedáficos, fitogeográficos y paleoecológicos. *Pirineos*, 172. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172001>
- Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal*. Editorial La Serranía.
- González-Hernández, A. (2021). *Biogeografía y conservación de dos especies de la flora relictas del Mediterráneo Occidental: Abies pinsapo Boiss. y Cedrus atlantica (Endl.) Carrière* (Tesis Doctoral). Universidad de Granada.
- Gonzalo, J., García, J.M. & Allué, C. (2004). Potencialidades y adecuaciones fitoclimáticas de *Abies pinsapo* Boiss. en España. *Montes*, 77, 24–32

- Gurrutxaga, M. & Lozano-Valencia, P.J. (2008). Evidencias sobre la eficacia de los corredores ecológicos: ¿Solucionan la problemática de fragmentación de hábitats? *Observatorio Medioambiental*, 11, 171–183
- Gutiérrez-Hernández, O., Cámara-Artigas, R. & García, L.V. (2017). Nicho ecológico y distribución geográfica del pinsapo (*Abies pinsapo*. Boiss). *Takurunna*, 6-7.
- Gutiérrez-Hernández, O. (2018). Impacto del calentamiento global en la distribución y supervivencia del pinsapo (Serranía de Ronda). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 76, 504–549. <https://doi.org/10.21138/bage.2532>
- Guzmán, J.R., Catalina, M.A., Navarro-Cerrillo, R.F., López-Quintanilla, J. & Sánchez, R. (2012). Los paisajes del pinsapo a través del tiempo. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 111–158). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Hilty, J., Worboys, G.L., Keeley, A., Woodley, S., Lausche, B. et al. (2020). *Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors*. IUCN.
- Hodgson, J.A., Thomas, C.D., Wintle, B.A. & Moilanen, A. (2009). Climate change, connectivity and conservation decision making: back to basics. *Journal of Applied Ecology*, 46(5), 964–96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01695.x>
- Holtmeier, F.K. & Broll, G. (2007). Treeline advance – driving processes and adverse factors. *Landscape Online*, 1, 1–33. <https://doi.org/10.3097/LO.200701>
- Jalut, G., Esteban, A., Bonnet, L., Gauquelin, T. & Fontugne, M. (2000). Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(3-4), 255–290. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00075-4)
- Jongman, R. (1995). Nature conservation planning in Europe: developing ecological networks. *Landscape and Urban Planning*, 32(3), 169–183. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(95\)00197-O](https://doi.org/10.1016/0169-2046(95)00197-O)
- Jordá, J.F. & Aura, J.E. (2008). 70 fechas para una cueva. Revisión crítica de 70 dataciones C14 del Pleistoceno Superior y Holoceno de la Cueva de Nerja (Málaga, Andalucía, España). *Espacio, Tiempo y Forma. Serie I, Nueva época. Prehistoria y Arqueología*, 1, 239–256. <https://doi.org/10.5944/etfi.1.2008.1922>
- Junta de Andalucía (2012). *Guía de los paisajes del pinsapar. Un recorrido histórico a partir de las referencias históricas previas al siglo XXI*. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.
- Junta de Andalucía (2014). *Escenarios locales de cambio climático. Clasificación del Índice de distribución potencial del Pinsapo (Abies pinsapo)*. Recuperado de <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/rediam>

- Krosby, M., Tewksbury, J., Haddad, N. & Hoekstra, J. (2010). Ecological Connectivity for a Changing Climate. *Conservation Biology*, 24(6), 1686–1689. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01585.x>
- Kulakowski, D., Seidl, R., Holeska, J., Kuuluvainen, T., Nagel, T.A. et al. (2017). A walk on the wild side: Disturbance dynamics and the conservation and management of European mountain forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 388, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.037>
- Lalechère, E. & Bergès, L. (2021). A Validation Procedure for Ecological Corridor Locations. *Land*, 10(12), 1320. <https://doi.org/10.3390/land10121320>
- Lázaro-Gimeno, D., Luque, J.A., Ibars, A.M., García-Nogales, A., Rodríguez, J.P.G. et al. (2013). Impacto del ozono troposférico en *Abies pinsapo* Boiss. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 389–399). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Lenoir, J. & Svenning, J.C. (2014). Climate-related range shifts – a global multidimensional synthesis and new research directions. *Ecography*, 38, 15–28. <https://doi.org/10.1111/ecog.00967>
- Liétor, J., Linares, J.C., Martín-García, J.M., García-Ruiz, R. & Carreira, J.A. (2003). Relaciones suelo-planta en bosques de *Abies pinsapo* Boiss. Disponibilidad de nutrientes y estatus nutricional. *Acta Botánica Malacitana*, 28, 89–104. <https://doi.org/10.24310/abm.v28i0.7269>
- Linares, J.C. (2011). Biogeography and evolution of *Abies* (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: the roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 38(4), 619–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02458.x>
- Linares, J.C., Camarero, J.J. & Carreira, J.A. (2009). Interacting effects of changes in climate and forest cover on mortality and growth of the southernmost European fir forests. *Global Ecology and Biogeography*, 18(4), 485–497. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00465.x>
- Lopez-Albarado, J. & Farris, E. (2022). Ecology and Evolution of Plants in the Mediterranean Basin: Perspectives and Challenges. *Plants*, 11(12), 1584. <https://doi.org/10.3390/plants11121584>
- López-Quintanilla, J. (2013). *Los pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Universidad de Córdoba.
- López-Sáez, J.A., López-García, P. & Cortés-Sánchez, M. (2007). Paleovegetación del Cuaternario reciente: Estudio arqueopalinológico. En Cortés-Sánchez, M. (Ed.), *Cueva Bajondillo (Torremolinos). Secuencia cronocultural y paleoambiental del Cuaternario reciente en la Bahía de Málaga* (pp. 139–156). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga.

- López-Tirado, J. & Hidalgo, P. (2014). A high resolution predictive model for relict trees in the Mediterranean-mountain forests (*Pinus sylvestris* L., *P. nigra* Arnold and *Abies pinsapo* Boiss.) from the south of Spain: A reliable management tool for reforestation. *Forest Ecology and Management*, 330, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.009>
- Martín-Martín, C., Bunce, R.G.H., Saura, S. & Elena-Roselló, R. (2013). Changes and interactions between forest landscape connectivity and burnt area in Spain. *Ecological Indicators*, 33, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.018>
- Martos-Martín, J. & Gómez-Zotano, J. (2021). Sierra Bermeja y los grandes incendios forestales. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 391–437). Editorial La Serranía.
- Médail, F. & Diadema, K. (2009). Glacial refugia influence plant diversity patterns in the Mediterranean Basin. *Journal of Biogeography*, 36(7), 1333–1345. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2008.02051.x>
- Médail, F., Monnet, A.C., Pavon, D., Nikolic, T., Dimopoulos, P. et al. (2019). What is a tree in the Mediterranean Basin hotspot? A critical analysis. *Forest Ecosystems*, 6(17). <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0170-6>
- Merenlender, A.M., Keeley, A. & Hilty, J. (2022). Ecological corridors for which species? *Therya*, 13(1), 45–55. <https://doi.org/10.12933/therya-22-1162>
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2023). *Estadísticas de incendios forestales*. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/Incendios_default.aspx
- Morera-Beita, C., Sandoval-Murillo, F. & Alfaro, L. (2021). Ecological corridors in Costa Rica: An evaluation applying landscape structure, fragmentation-connectivity process, and climate adaptation. *Conservation Science and Practice*, 3(8), e475. <https://doi.org/10.1111/csp2.475>
- Navarro, R.M., Fernández, L., Blanco-Oyonarte, P., Calzado, C., López-Quintanilla, J. et al. (2006). Physiography potentiality of Spanish fir forests (*Abies pinsapo* Boiss.) in Andalucía. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 15, 137–152. <https://doi.org/10.5424/srf/200615S1-00988>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2017). Paleoecología de *Abies* sp. en Sierra Bermeja (sur de la península ibérica) durante el Holoceno medio a partir del análisis pedoantracológico. *Bosque*, 38(2), 259–270. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200004>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Gómez-Zotano, J. (2019). The native status of *Pinus pinaster* on serpentine soils: charcoal analysis and palaeoenvironmental history in Sierra Bermeja (southern Iberian Peninsula, Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*, 28, 417–432. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0701-z>

- Olmedo-Cobo, J.A., Pardo-Martínez, R. & Gómez-Zotano, J. (2021). First data about the Holocene composition of mountain forests in the Sierra de las Nieves Natural Park (Ronda Mountains, Spain) through pedoanthracological analysis. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 89. <https://doi.org/10.21138/bage.3099>
- Pardo-Martínez, R. (2020). La pedoantracología en España: una revisión bibliográfica. *Pirineos*, 175, e059. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2020.175009>
- Pardo-Martínez, R., Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). The history of *Abies pinsapo* during the Holocene in southern Spain, based on pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 31, 307–321. <https://doi.org/10.1007/s00334-021-00855-w>
- Pérez-Latorre, A., Cabezudo, B., Gálán de Mera, A. & Carrión, J. (2001). El papel de las gimnospermas en la vegetación forestal de Andalucía. *Medio Ambiente*, 38, 30–33
- Pérez-Latorre, A. & Hidalgo-Triana, N. (2017). Los hábitats de Sierra Bermeja: exclusividad en vegetación y ecosistemas a nivel europeo y mediterráneo. *Takurunnna*, 6-7, 89–106
- Pérez-Latorre, A.V., Hidalgo-Triana, N. & Cabezudo, B. (2020). Biogeografía y bosques de la Serranía de Ronda (Cádiz-Málaga-Sevilla). En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp.11–58). Editorial La Serranía.
- Pino, J. & Marull, J. (2012). Ecological networks: Are they enough for connectivity conservation? A case study in the Barcelona Metropolitan Region (NE Spain). *Land Use Policy*, 29(3), 684–690. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.11.004>
- Ramos-Muñoz, J., Siles-Guerrero, F., Gutiérrez-López, J.M., Martínez-Enamorado, V. & Martín-Ruiz, J.A. (2017). *Actas del I Congreso internacional de historia de la Serranía de Ronda: las ocupaciones por sociedades prehistóricas, protohistóricas y de la antigüedad en la Serranía de Ronda y Béticas Occidentales*. Editorial La Serranía.
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G. et al. (2020) The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Rodríguez-Rodríguez, D. & Martínez-Vega, J. (2017). Assessing recent environmental sustainability in the Spanish network of National Parks and their statutory peripheral areas. *Applied Geography*, 89, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.09.008>
- Rudnick, D.A., Ryan, S.J., Beier, P., Cushman, S.A., Dieffenbach, F. et al. (2012). The role of landscape connectivity in planning and implementing conservation and restoration priorities. *Issues in Ecology*, 16, 1–20.

- Ruiz-Labourdette, D., Schmitz, M. & Pineda, F. (2013). Changes in tree species composition in Mediterranean mountains under climate change: Indicators for conservation planning. *Ecological Indicators*, 24, 310–323. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.06.021>
- Schweingruber, F.H. (1990). *Microscopic wood anatomy: structural variability of stems and twigs in recent and subfossil woods from Central Europe*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
- Stephens, S.L., Agee, J.K., Fule, P.Z., North, M.P., Romme, W.H. et al. (2013). Managing Forests and Fire in Changing Climates. *Science*, 342(6154), 41–42. <https://doi.org/10.1126/science.124029>
- Talon, B., Carcaillet, C. & Thion, M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Geographie Physique et Quaternaire*, 52(2), 195–208. <https://doi.org/10.7202/004875ar>
- Torres-Cabañete, P., Hinojosa, M.B., García-Ruiz, R., Daniell, T. & Carreira, J.A. (2009). Relación entre variabilidad biogeoquímica y rasgos estructurales de la comunidad microbiana en suelos forestales: Bosques de *Abies pinsapo* como caso de estudio. *Ecosistemas*, 18(2), 91–102.
- Urbieto, I.R., Franquesa, M., Viedma, O. & Moreno, J.M. (2019). Fire activity and burned forest lands decreased during the last three decades in Spain. *Annals of Forest Science*, 76(3), 90. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0874-3>
- Van der Windt, H.J. & Swart, J.A.A. (2007). Ecological corridors, connecting science and politics: the case of the Green River in the Netherlands. *Journal of Applied Ecology*, 45(1), 124–132. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01404.x>
- Vernet, J.L., Ogereau, P., Figueiral, I., Machado, C. & Uzquiano, P. (2001). *Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents, Sud-Ouest de l'Europe: France, Péninsule ibérique et Îles Canaries*. CNRS.
- Worboys, G.L., Francis, W.L. & Lockwood, M. (2010). *Connectivity Conservation Management: A Global Guide*. Earthscan.

12. EUROPE'S SOUTHERNMOST INTERGLACIAL REFUGIA AS SENTINELS FOR THE LOCAL EXTINCTION OF MOUNTAIN CONIFERS

Abstract

The Serranía de Ronda is an exceptional palaeoecological laboratory for studying the dynamics of vegetation over time, due to its strategic geographical location at a biogeographical crossroads and its proven historical legacy. Many of the mountains that form part of this territory are today practically deforested, such as Sierra Blanca, whose geographic location at the heart of the Serranía de Ronda means that it has enormous potential as a biogeographical crossroads: the occasional presence of *Abies pinsapo*, *Pinus pinaster* and *Quercus rotundifolia* suggests that it was once covered by a mixed forest of conifers and broad-leaved trees. The lack of environmental research in Sierra Blanca has facilitated the installation of large quarries, which have led to its exclusion from the Sierra de las Nieves National Park, which was created in 2021. We applied the pedoanthracological methodology, which has enabled us to discover paleo-populations of *A. pinsapo* and *Pinus nigra/sylvestris*-type. The results confirm that coniferous forests previously covered a much wider area during the Holocene. These findings reinforce the role of Sierra Blanca as a high-altitude refuge for conifers during the warm stages of the Holocene and as a sentinel for the local extinction of mountain conifers. This information could help improve its management and conservation.

Keywords: charcoal; orophile forests; paleoecological approach; conservation; Western Baetic System; Iberian Peninsula.

Resumen

La Serranía de Ronda constituye un excepcional laboratorio paleoecológico para el estudio de las dinámicas de la vegetación a lo largo del tiempo, debido a su estratégica situación biogeográfica y a su contrastado legado histórico. Muchos de los relieves montañosos que forman parte de este territorio se encuentran hoy prácticamente deforestados, como es el caso de Sierra Blanca, cuya situación geográfica en el corazón de la Serranía de Ronda le confiere un enorme potencial como encrucijada biogeográfica: la presencia puntual de *Abies pinsapo*, *Pinus pinaster* y *Quercus rotundifolia* sugiere que en su día estuvo cubierta por un bosque mixto de coníferas y frondosas. Este desconocimiento de su medio ambiente ha abierto la puerta a una desproporcionada explotación minera que ha impedido la inclusión de Sierra Blanca en el recién creado Parque Nacional Sierra de las Nieves. Para solventar esta falta de conocimiento, y la problemática ambiental derivada, se aplica la metodología pedoantracológica en Sierra Blanca, la cual ha permitido descubrir paleopoblaciones de *A. pinsapo* y *Pinus* tipo *nigra/sylvestris*. Los resultados confirman que los bosques de coníferas cubrían un área mucho más amplia durante el Holoceno. Estos hallazgos refuerzan la importancia que tuvo Sierra Blanca como refugio de coníferas altimontanas durante las etapas cálidas del Holoceno y su papel como centinela de la extinción local de ciertas coníferas de

montaña. Esta información podría ayudar a mejorar la conservación y gestión adaptativa de estos bosques relictos.

Palabras clave: carbón; bosques orófilos; aproximación paleoecológica; conservación; Cordillera Bética occidental; península ibérica.

12.1. Introduction

Throughout the Holocene, landscapes have undergone important transformations in a context of Global Change, where climatic variability, paleo-ecological processes and increasing human activity have played a defining role in the last 15 000 years (Carcaillet & Thinon, 1996; Cunill et al., 2012). In this scenario, in which mountain conifer forests have undergone quite dramatic processes of change, such as altitudinal fluctuations and extinction of populations, the cold-adapted species managed to survive in mountain refugia during the interglacial periods. This means that the comparative study of the tree line (the highest altitude that sustains trees) –a hitherto unexplored environmental frontier in the Mediterranean ranges– could offer valuable paleoenvironmental information for the bodies responsible for managing forests and the environment in general (Alba-Sánchez et al., 2021a).

One example of these taxa is the Spanish fir (*Abies pinsapo* Clemente ex Boiss.), a tree species of great ecological and landscape value, being the only fir tree that grows naturally in the South of Spain (Linares et al., 2010; López-Quintanilla, 2013). At present the only survivor species of fir in Southern Spain (*A. pinsapo*) is only found in the Western Baetic System, and is endemic to the Rondeño and Bermejense biogeographic sectors in the Serranía de Ronda. Within this vast mountainous territory, it can be found specifically in the Sierra de las Nieves National Park and Sierra Bermeja Natural Site (province of Malaga), and in the Sierra del Pinar and the Sierra del Endrinal (province of Cádiz), within the Sierra de Grazalema Natural Park (Gutiérrez-Hernández et al., 2017; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021).

These mountain areas –especially those above 1000 m a.s.l.– still have similar ecological characteristics to those existing in the southernmost part of the Iberian Peninsula during the Last Glacial Maximum (Carrión et al., 2012, 2015); the altitudinal gradient of these mountains has enabled this species to migrate in altitude in search of the ideal ecological conditions for its survival (both during the Last Glacial Maximum when it moved towards the coast, and in the Holocene when it moved to higher altitudes). The migration of the Spanish fir during periods of warm conditions in the present interglacial period has been demonstrated by González-Hernández et al. (2021). These biogeographical refuges have made it possible for the Spanish fir to survive until the present day (Linares, 2011). As a consequence of its geographical isolation, the species would evolve independently from other fir trees of the Mediterranean Basin (Jaramillo et al., 2010; Cobo-Simón et al., 2020).

The reduced, fragmented distribution of *A. pinsapo* today and its much wider geographic distribution area in the past raises the following questions: Where was it found in the past? and

what caused its local extinction in much of the Western Baetic System? It is difficult to answer these questions with any degree of certainty because our knowledge of the paleobiogeography of the species is specific to each sector and quite deficient despite the uniqueness and biogeographic originality of this species, as well as the development in recent years of new methodologies and techniques for reconstructing the past landscape. In order to answer these questions, we need to carry out a paleoecological study of the species in the entire Western Baetic System (Serranía de Ronda).

Several pedoanthracological studies have been carried out in this area to improve the knowledge about the past distribution area of Spanish fir and to propose a model of ecological connectivity for its relict cores (i.e; Olmedo-Cobo et al., 2019ab, 2021; Gómez-Zotano et al., 2021; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021; Pardo-Martínez et al., 2021). The results of the pedoanthracological analyses confirm our starting hypothesis, that the area of distribution of the Spanish fir was larger in the past, as also confirmed by the other sources of information consulted: historical sources, studies of present-day habitats, pollen and Species Distribution Models (SDMs). The palaeoecological data obtained have not only helped to improve the palaeobiogeography of *A. pinsapo* in the Serranía de Ronda, but have also confirmed the native character of *Pinus pinaster* on ultramafic soils (Gómez-Zotano et al., 2017, 2021; Olmedo-Cobo et al., 2019ab; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021). These findings confirm that conifers, including *A. pinsapo* and *P. pinaster*, would be the climax community in the Serranía de Ronda during the Holocene. To date, there is no pedoanthracological evidence of other potential high-elevation conifers (*P. nigra/sylvestris*-type), currently absent in the Western Baetic System.

To this end, a complete paleo-environmental reconstruction of the forests in the Serranía de Ronda is required, for which many of its mountain areas have yet to be analysed. One of these is the Sierra Blanca de Igualeja. Due to its geographical situation and its physical and environmental conditions, this mountain could be an important biogeographical hub within the heart of the Serranía de Ronda. It is particularly interesting as a potential link between two highly forested Sierras, the peridotite Sierra Bermeja and the limestone Sierra de las Nieves – recently declared a National Park–, where unconnected populations of *A. pinsapo*, continue to survive amongst many other species of conifers and broad-leaved trees.

Unlike the aforementioned sierras, Sierra Blanca is today practically deforested; the lack of forests makes it difficult to find out more about the climax vegetation in this area, beyond that revealed by phytosociological studies and Species Distribution Models (SDMs). The occasional presence of individual *Quercus rotundifolia*, *A. pinsapo* and *P. pinaster* trees suggests that it was once covered by a mixed forest of conifers and broad-leaved trees. However, there are no paleobiogeographic studies to determine: i) whether these species migrated to different altitudes during interglacial periods, ii) whether they are autochthonous to this area or iii) the role they may have played in connecting different species.

In order to fill this knowledge gap, pedoanthracological analysis is applied for the first time in Sierra Blanca. The results corroborate our initial hypothesis that coniferous forests previously

covered a much wider area during the Holocene. Paleo-populations of *A. pinsapo* have been found, as well as a taxonomic group of *Pinus* that is now extinct throughout the Serranía de Ronda (*P. nigra/sylvestris*-type). These findings reinforce the role played by high-elevation conifers during the Holocene.

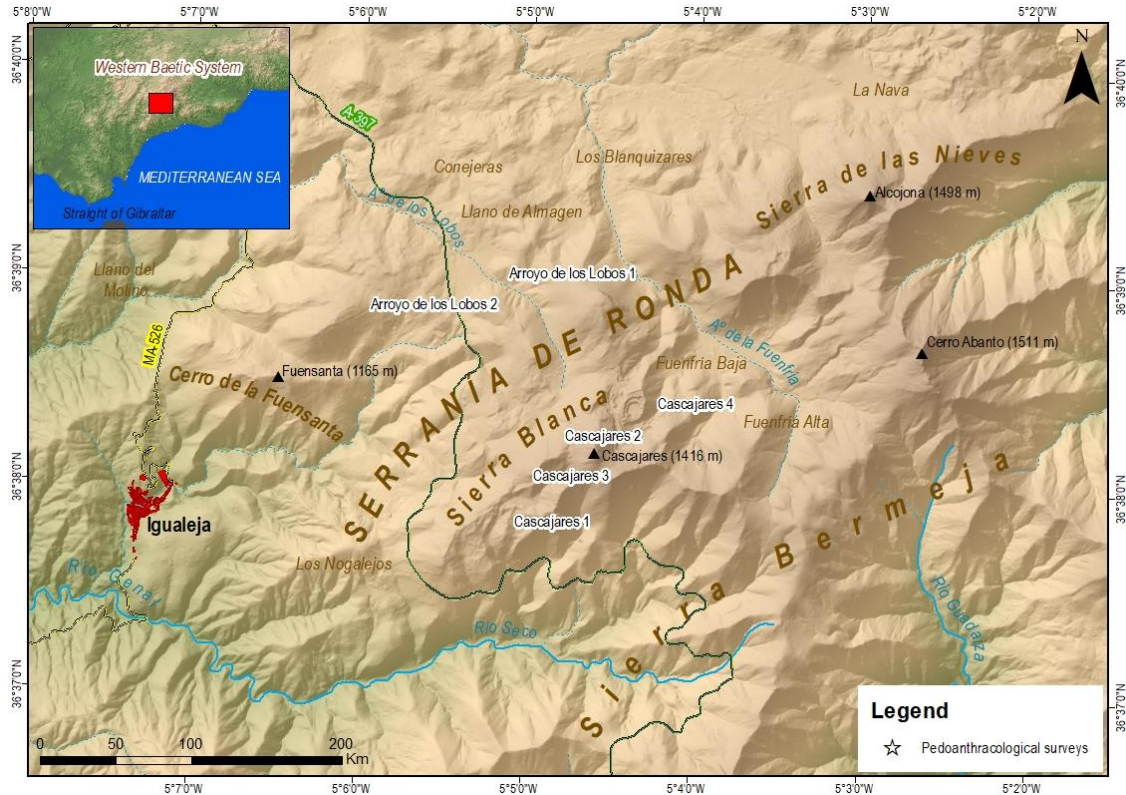
Studies of this kind are important for four main reasons: i) to reconstruct past forest ecosystems; ii) to study the dynamics of these ecosystems during different paleohistoric phases, identifying the main disturbances (climatic and/or anthropic); iii) to discover local extinctions due to anthropic or climatic action; iv) for their potential application in present-day forest management.

12.2. Methods

12.2.1. Study area

The research has been conducted in Sierra Blanca, a limestone massif in the Western Baetic System (Serranía de Ronda). It is bordered to the south/southeast by the Sierra Bermeja, by the Genal Valley to the south and west, and by the Sierra de las Nieves to the north/northwest (36°37'55"N, 5°05'04"W). Its highest point is in Cerro Cascajares (1416 m a.s.l.) and it is the source of important rivers in this area such as the Genal (río Seco and Nacimiento de Igualaja) and the Guadiaro (Arroyo de la Fuenfría-Guadalevín) (Figure 29).

Figure 29. Sites sampled during this research (numbers and sites in Table 10).



Source: own elaboration based on data from CNIG and IECA.

Sierra Blanca belongs to the Frontier Units of the Inner Zone of the Baetic System. It is part of the unit of Las Nieves (previously known as the Rondaide domain), essentially carbonated and partially affected by contact metamorphism in the area near the intrusion of peridotites in Sierra Bermeja. The contact halo is composed from south to north by massive white saccharoid marbles (after which the Sierra is named), massive, white-blue crystalline limestones and black layered limestone with loamy levels (Serrano-Lozano & Guerra-Merchan, 2004; Instituto Geológico y Minero de España, 2007).

According to Gómez-Zotano et al. (2020), the relief of Sierra Blanca is strongly associated with the tectonic and structural elements. A typical karst formation can be observed on its steep slopes, which is dominated by bare limestone pavements with sinkholes, drains, caves, upwellings, travertines and scree (active and cemented).

This mountain has a humid semi-continental Mediterranean climate (Gómez-Zotano et al., 2016). It is a temperate-cool, mid-mountain climate that is noticeably humid thanks to the strong Atlantic influence, and also to the easterly, rain-bearing winds that create crypto-precipitation due to the low, lingering clouds in the Strait of Gibraltar. In any case, rainfall and temperature are locally affected by differences in altitude and by varying exposure to the sun/shade, which determines its classification as a semi-continental climate within the context of Serranía de Ronda (index levels 15 to 16; Olmedo-Cobo & Gómez-Zotano, 2017).

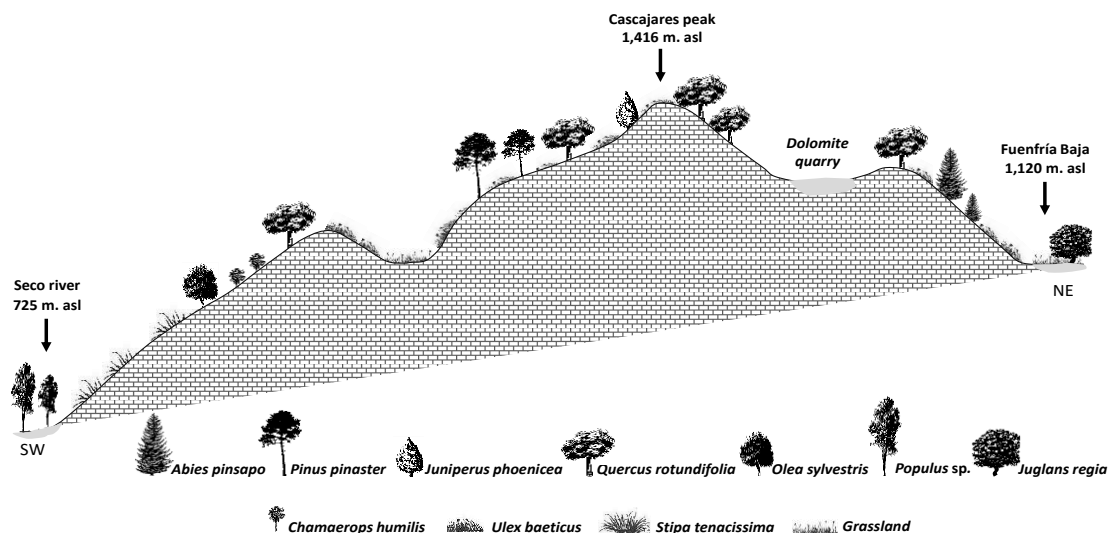
The soils vary considerably and the most common association is lithosolic Leptosol-Regosol. These display generally and exclusively an ochric epipedon, with brown to red colours, which very occasionally could be classified as mollic. The larger cracks and gaps are filled with a fine matrix, where discontinuous illuvation cutans with uneven development can be observed. This soil type is defined as lepti-chromic luvisols (pink earth) (Guerra-Merchán, 1998).

The vegetation of Sierra Blanca has been characterized by Gómez-Zotano et al. (2020). According to other studies of this area (Pérez-Latorre et al., 1998, 2021), the potential formations must have belonged to the Baetic series of meso-Mediterranean holm oak forest with the typical particularities, of the Rondense biogeographical subsector. This series is characterised by the presence of holm oak forest as the most evolved community, typical of soils with basic pH (such as the leptosols and regosols which have formed on top of marbles), whose degradation in increasingly xeric environments and increasingly poor soils has led to the progressive appearance of kermes oak, retama, esparto, rosemary and thyme fields (Consejería de Medio Ambiente, 2004).

Gómez Zotano et al. (2019) identified different variants of this holm oak forest at the altitudinal gradient between Río Seco (740 m) and Cascajares (1416 m), and a marked sun/shade orientation. These form an altitude-based series of present-day vegetation made up of the following formations (Figure 30): in thermophile and edapho-xerophile environments in the base area and the most exposed hillsides, with strong sunlight, the wild olive (*Olea europea* subsp. *sylvestris*) is often present with *Chamaerops humilis*. Scattered remains can be found of

basophile holm oak forest, of which robust examples can be found near Los Nogalejos. In the coolest environments, together with the holm oaks, thorn bushes typical of the pre-forest border of humid forests appear. These are mainly formations of *Berberis vulgaris* subsp. *australis*, *Crataegus monogyna* and *Rosa canina*, which specifically indicate the potentiality of the *A. pinsapo* Spanish fir forest of which a few examples still remain on a shady hillside situated to the south-east of Fuenfría Baja and others near the Llano de Almagen. Given the scarcity of trees, these areas are dominated by some of the substitution stages referred to above, essentially gorse (*Ulex baeticus* subsp. *baeticus*) and juniper bushes (*Juniperus communis*) accompanied by *Cistus albidus*, *Rosmarinus officinalis*, *Lavandula lanata* or *Phillyrea latifolia*. *Arenaria erinacea* appears in meadows, crests and windy hillsides. Finally, the most xeric hillsides are colonized by espartos, where *Stipa tenacissima* dominates together with other perennial tillered gramineae such as *Helictotrichon filifolium* subsp. *arundanum*.

Figure 30. Altitudinal zonation of the current vegetation in Sierra Blanca de Igualaja.



Source: own elaboration.

In hillsides exposed to sunlight, with steep slopes and poor soils that lead to low availability of soil moisture, isolated tesserae of *Pinus halepensis* and *P. pinaster* appear, which take the place of the mature stage of the holm oak in these conditions of low humidity and precipitation. The relict presence of Phoenician juniper (*Juniperus phoenicea*), of great biogeographical interest in this area, reinforces the role of the conifers as permanent communities on crests and steep hillsides on soils that have evolved little, where they probably took the place of the holm oak forest. In the case of the Phoenician juniper, the presence of abundant remains of wood from this Cupressaceae in a nearby old marble quarry, shows that it had a more significant role in quite recent times, which indicates that the edapho-xerophile formations have also suffered massive deforestation. It is also important to point out that *P. pinaster*, unlike the green pine forests which grow on the peridotites, display a more yellowish colour which may be symptomatic of iron chlorosis, although they reach much greater ages and sizes than the pine forests in Sierra Bermeja.

Sierra Blanca is a publicly-owned mountain range belonging to the Town Council of Igualeja (province of Malaga), which has been subject to very intense anthropic use over the course of history. According to Gómez-Zotano (2004, 2006ab) and Gómez-Zotano et al. (2020) there has been severe deforestation over the centuries with several episodes of particular note: a) the installation and start-up in 1730 of the Royal Tinplate Factory in San Miguel de Júzcar, which led to the felling of a large part of the forests in the Genal Valley to supply wood; b) the exploitation of marble quarries and magnetite mines in contact with the peridotites during the 18th and 19th centuries; c) the process of expropriation carried out during the 19th century, which led to the ploughing of areas of wild vegetation around the new farmhouses established on publicly owned land in the mountains; d) continuous livestock grazing, charcoal production, lime extraction or the collection of esparto among other traditional mountain activities. The simultaneous pressure from all these different activities meant that by the mid-20th century, the Sierra was completely bare and had largely been abandoned due to the incipient rural exodus. The rare efforts to repopulate the forests in subsequent decades fell victim to the forest fire of 31 July 2004, which affected an area of 94 ha.

Nowadays, the Sierra is used for extensive farming of sheep and goats, sufficient to prevent the spontaneous regeneration of the vegetation. In addition, there has been a resurgence in quarrying activity in response to the demand from the booming construction industry on the Costa del Sol. The quarrying of marble and aggregates has had a strong impact on the environment and landscape of Sierra Blanca, without this being tackled in any way by environmental or landscape restoration measures.

As a result, Sierra Blanca was not included in the recently declared Sierra de las Nieves National Park, so failing to achieve the only protection status that could have halted the environmental deterioration of the Sierra. Other attempts to protect it have proved ineffective, in that for example Sierra Blanca is fully integrated into the Intercontinental Biosphere Reserve of the Mediterranean: Andalusia (Spain) – Morocco, and also belongs to the Natura 2000 network with three Special Areas of Conservation (ES6170010 Sierras Bermeja y Real, ES6170006 Sierra de Las Nieves and ES6170016 Valle del Río del Genal), without this having resulted in any effective form of protection.

12.2.2. Methodology

In this research we followed the protocols for the pedoanthracological method established by Thinon (1978) and adapted by Talon et al. (1998) and Cunill (2010). To this end we carried out six pedological sampling, which covered almost the entire study area (Figure 29, Table 10). In each sampling, we identified between one and four sampling levels, coinciding with the different soil horizons. We then collected between 3 and 15 kg of soil for each level. The soil was processed in the laboratory using the sieving-with-water technique (mesh sizes of 5, 2 and 0.8 mm). Later, once the mineral fraction collected in the mesh after the sieving process had dried, the charcoal contained in the mineral fraction was selected manually by using a binocular

magnifying glass. The absolute anthracomass (mg of charcoal/kg of mineral residue) was then calculated for each sampling level.

Table 10. Geographic characteristics of the sampling sites.

Name	Coordinates	Altitude (m a.s.l.), thermotype and ombrotype	Geo- ecological environment	Substrata and soil type	Depth of the sampling (cm) / sampling levels	Flora and vegetation
Cascajares 1	36°37'55"N; 05°05'04"W (X=313640; Y=4056081)	1236 Mesomediterranean subhumid	Bottom of sinkhole S (gradient of 0 %) - Basophilic grassland	Clays and massive white marbles; hemic Histosol type soil	112 / 3	<i>Poo bulbosae- Astragaletum sesamei</i> : Grassland (4), <i>Phlomis crinita</i> (+), <i>Phlomis lychnitis</i> (+), <i>Ulex parviflorus</i> (+).
Cascajares 2	36°38'11"N; 05°04'45"W (X=314115; Y=4056550)	1319 Mesomediterranean humid	NE mountainside (gradient less than 5 %) - Basophilic grassland	Massive white marbles; leptosol type soil	23 / 3	<i>Paeonio coriaceae- Quercetum rotundifoliae</i> : Grassland (3), <i>Phlomis crinita</i> (2), <i>Bupleurum spinosum</i> (1), <i>Ulex baeticus</i> (1), <i>Arenaria erinacea</i> (+).
Cascajares 3	36°38'08"N; 05°04'40"W (X=314218; Y=4056458)	1351 Mesomediterranean subhumid	W mountainside (gradient of 5 %) - Basophilic grassland	Massive white marbles; leptosol type soil	42 / 2	<i>Paeonio coriaceae- Quercetum rotundifoliae</i> : Grassland (3), <i>Ulex baeticus</i> (2), <i>Bupleurum spinosum</i> (1), <i>Thymus mastichina</i> (1), <i>Carduncellus</i> sp. (1), <i>Phlomis crinita</i> (1), <i>Rhamnus pumila</i> (1).
Cascajares 4	36°38'19"N; 05°04'09"W (X=314999; Y=4056795)	1260 Mesomediterranean humid	NW mountainside (gradient of 10 %) - Scrub with pines on slope	Massive white marbles; regosol type soil	97 / 3	<i>Paeonio coriaceae- Quercetum rotundifoliae</i> : <i>Ulex baeticus</i> (3), <i>Cistus</i>

						<i>albidus</i> (2), <i>Phlomis crinita</i> (1), <i>Pinus pinaster</i> (1), <i>Pteridium aquilinum</i> (1), <i>Thymus mastichina</i> (1), <i>Bupleurum spinosum</i> (+), <i>Crataegus</i> sp. (+), <i>Daphne gnidium</i> (+), <i>Ptilostemum hispanicum</i> (+), <i>Quercus rotundifolia</i> (sapling) (+) <i>Rhamnus pumila</i> (+), <i>Rubia peregrina</i> (+).
Arroyo de los Lobos I	36°38'56"N; 05°05'06"W (X=313607; Y=4057953)	1122 Mesomediterranean humid	N mountainside (gradient of 2 %) - Basophilic grassland	Black layered limestone with loamy levels; Luvisol type soil	82 / 4	<i>Paeonio coriaceae-Quercetum rotundifoliae</i> : Grassland (4), <i>Phlomis purpurea</i> (3), <i>Cistus albidus</i> (1), <i>Daphne gnidium</i> (1), <i>Helichrysum stoechas</i> (1), <i>Pinus pinaster</i> (1), <i>Quercus rotundifolia</i> (+), <i>Thymus mastichina</i> (1), <i>Crataegus monogyna</i> (+), <i>Lavandula lanata</i> (+), <i>Ulex parviflorus</i> (+).
Arroyo de los Lobos II	36°38'57"N; 05°05'12"W (X=313497; Y=4057929)	1142 Mesomediterranean humid	N mountainside (gradient of 7 %) – Scrub	Black layered limestone with loamy levels; Luvisol	40 / 4	<i>Paeonio coriaceae-Quercetum rotundifoliae</i> : <i>Cistus albidus</i> (3), <i>Pinus</i>

				type soil		<i>pinaster</i> (2), <i>Daphne gnidium</i> (1).
--	--	--	--	-----------	--	-------------------------------------------------------

Source: own elaboration.

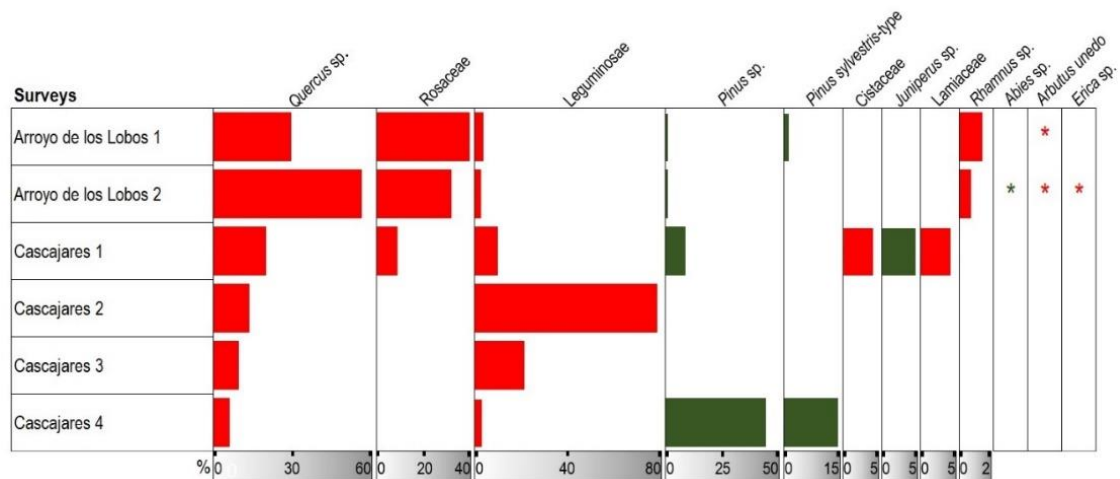
After a detailed study of the three wood faces (transverse, longitudinal radial and longitudinal tangential) using an incident light episcopic microscope (differential interference contrast, 50x, 100x, 200x and 500x), we tried to identify the taxa corresponding to the charcoal samples using the wood anatomy guides provided by Schweingruber (1990) and Vernet et al. (2001), and with the help of the reference collection of charcoals at the Laboratorio Terra of Granada University. A total of 940 fragments were analysed, 15 of which (1 *Abies* fragment, 5 *Pinus* and 9 *P. nigra/sylvestris*-type) were subjected to radiometric C¹⁴ AMS dating in specialized laboratories at the Poznań Radiocarbon Laboratory (Poznań, Poland) and the Alfred-Wegener-Institut (Bremerhaven, Germany). Calibration of the dated samples was carried out with Oxcal v.4.4. In particular, the IntCal20 database –2 sigma, 95 % probability– was used (Reimer et al., 2020).

12.3. Results

12.3.1. Taxa identification and anthracomass values

Figure 31 offers a summary of the pedoanthracological results obtained in this research.

Figure 31. Taxa identified in each one of the six samplings conducted (expressed in %).



Source: own elaboration.

12.3.2. Charcoal dating results

Table 11 shows the results for the 15 samples dated in this research (1 fragment of *Abies* sp., 5 of *Pinus* sp. and 9 of *P. nigra/sylvestris*-type).

Table 11. Charcoal dating.

Arroyo de los Lobos 1				
Taxa	Lab. Code	Level	MS C ¹⁴ age (years BP)	Cal. age BP
<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type	7990.1.1	III	9560 ± 124	11 210-10 565
Arroyo de los Lobos 2				
Taxa	Lab. Code	Level	MS C ¹⁴ age (years BP)	Cal. age BP
<i>Abies</i> sp.	6792.1.1	III	108 ± 23	143-25
Cascajares 1				
Taxa	Lab. Code	Level	MS C ¹⁴ age (years BP)	Cal. age BP
<i>Pinus</i> sp.	6253.1.1	III	9261 ± 88	10 605-10 240
<i>Pinus</i> sp.	6251.1.1	III	9153 ± 97	10 581-10 158
<i>Pinus</i> sp.	6252.1.1	III	8583 ± 94	9825-9421
<i>Pinus</i> sp.	6250.1.1	II	7473 ± 84	8416-8162
<i>Pinus</i> sp.	6249.1.1	I	139 ± 56	154-0
Cascajares 4				
Taxa	Lab. Code	Level	MS C ¹⁴ age (years BP)	Cal. age BP
<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type	7992.1.1	II	7472 ± 26	8365-8279
<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type	7997.1.1	III	7473 ± 25	8366-8280
<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type	7993.1.1	II	7352 ± 25	8198-8032
<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type	6793.1.1	III	7361 ± 23	8153-8033
<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type	7996.1.1	II	7405 ± 28	8333-8172
<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type	7995.1.1	II	7386 ± 25	8324-8166
<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type	7998.1.1	III	7335 ± 25	8184-8034
<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type	7994.1.1	II	7300 ± 104	8340-7940

Source: own elaboration.

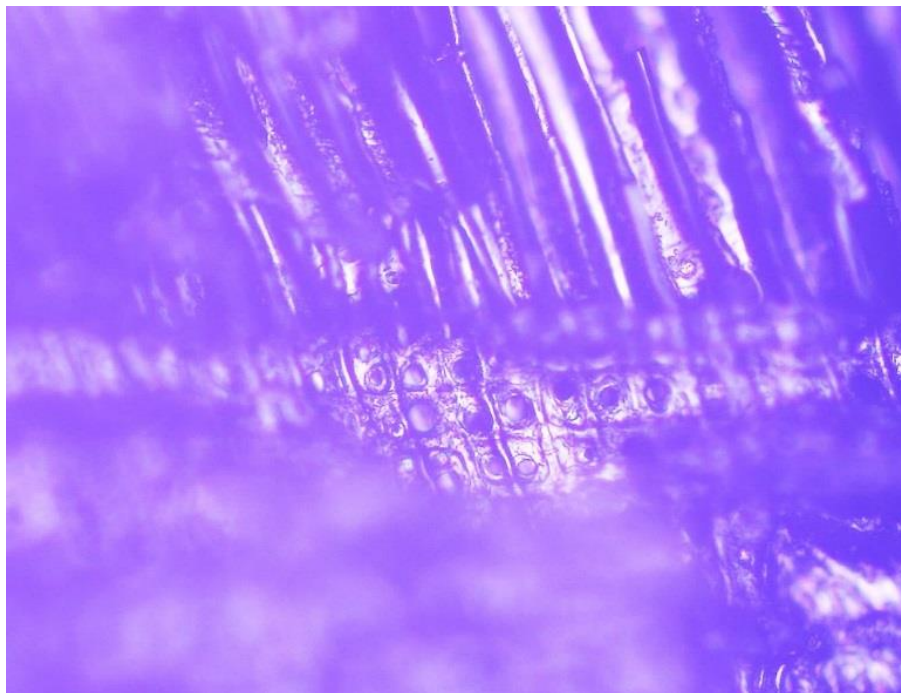
12.4. Discussion

The results of this research have enabled us to discover previously unknown ancient populations of *P. nigra/sylvestris*-type and *A. pinsapo* in enclaves considered as interglacial refugia, something that had previously been identified in palynological studies in mountain ranges in south-eastern Iberia such as the Sierra de Baza (Carrión et al., 2007), Sierra de María (González-Ramón et al., 2012), Sierra de Segura (Carrión, 2002), Sierra Nevada (Alba Sánchez et al., 2021a; Jiménez-Moreno et al., 2022) and Sierra de las Nieves (Alba-Sánchez et al., 2019, 2021b).

These findings provide new data on the past distribution area of coniferous forests in the Western Baetic System. According to various different wood anatomy atlases (Schweingruber, 1990; Vernet et al., 2001), *P. sylvestris* and *Pinus nigra* have very similar anatomical characteristics, which makes it impossible to distinguish them (Figure 32). This methodological difficulty can also be extended to other disciplines of a paleo-ecological nature such as palynology (Mander & Punyasena, 2014). However, other authors suggest the possibility of discriminating at a species level when there is a large volume of macro-remains of adult trees in a good state of preservation (Jacquot, 1955; García-Esteban & Guindeo, 1989).

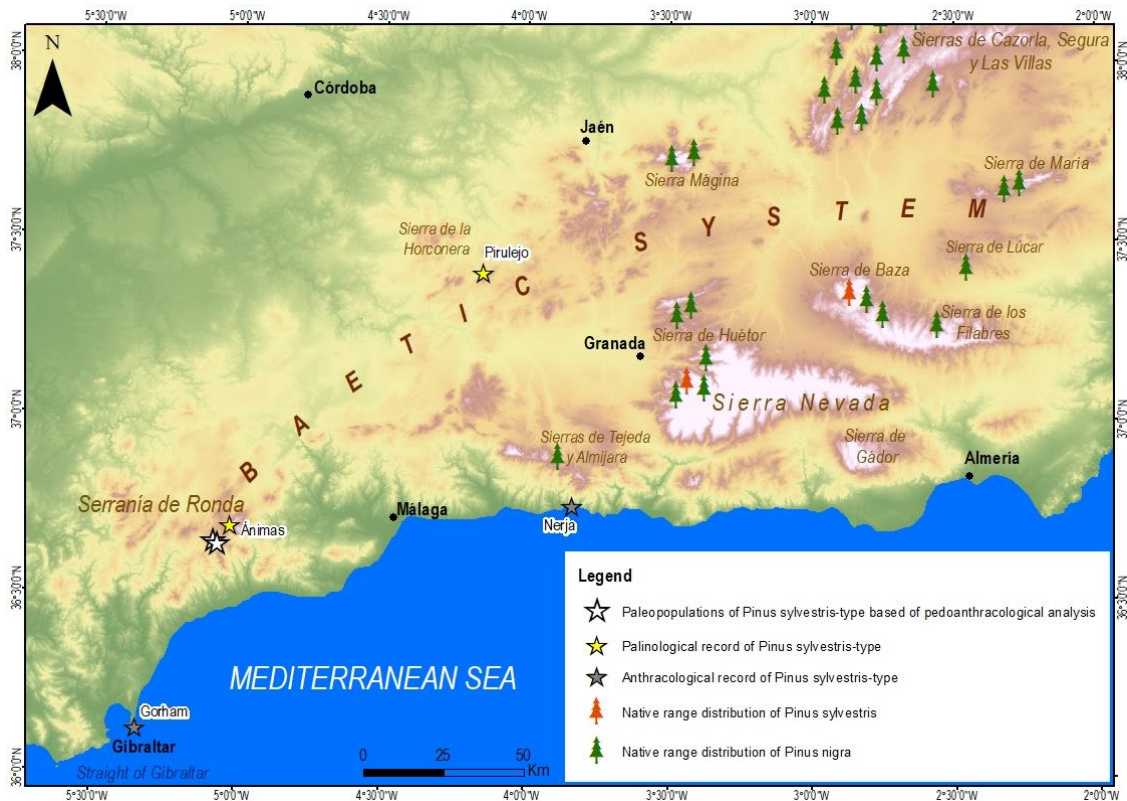
Most of the charcoal fragments collected in this study are smaller than 2 mm in size, a fact which in many cases has made it impossible to identify the species. In spite of this limitation, the results confirm the role of Sierra Blanca as a refuge for high mountain pine forests during the early stages of the Holocene, with various fragments of *P. nigra/sylvestris*-type dated between 11 210-10 565 and 8340-7940 years cal BP in north-facing locations (Table 11). This hypothesis confirms the conclusions obtained by Alba-Sánchez et al. (2021b) in the nearby Sierra de las Nieves, where pollen analysis detected the presence of *P. nigra/sylvestris*-type in the late Holocene. At a regional level, various different studies have confirmed the presence of high-elevation pine forests in basal areas of the extreme south-west of the Baetic System during the last millennia. In particular, the remains of pollen attributed to *P. nigra/sylvestris*-type found in the archaeological site of Pirulejo (Cordoba), with different nonsequential chronologies which range from the Older Dryas to the Holocene (López-Sáez et al., 2008). In Gorham Cave (Gibraltar), the anthracological record has also revealed the existence of cryophilic pine forests during the Last Glacial Maximum (Carrión et al., 2008; Finlayson et al., 2008). In the Cave of Nerja (Malaga), various fragments of charcoal attributed to Black Pines (*P. nigra*) were found with dates from the Gravettian until 11 930 years cal BP, coinciding with the Pleistocene-Holocene transition (Badal, 1991; Aura et al., 2002). From that point on a progressive reduction in Black Pine can be noted, which might indicate its movement towards higher altitudes. Likewise, the fact that the latter site is relatively near the study area, together with the greater proximity of certain relict masses of *P. nigra* compared to *P. sylvestris* (Euforgen, 2022), could help attribute the charcoal fragments identified as *P. nigra/sylvestris*-type to *P. nigra* (Figure 33).

Figure 32. Radial section of a charcoal fragment of *P. nigra/sylvestris*-type. One of its main anatomical characteristics is the existence of rays with large fenestriform pits.



Source: own elaboration.

Figure 33. Paleo-populations of *P. nigra/sylvestris*-type found during the research, other evidence of its past presence and current distribution range of *P. nigra* and *P. sylvestris* in the south of the Iberian Peninsula.



Source: own elaboration based on data from CNIG and IECA.

In addition, the identification of charcoal from *Abies* in Arroyo de los Lobos 2 —a locality in which this genus is currently absent— would confirm the presence of the Spanish fir in Sierra Blanca as recently as 143-25 years cal BP. Figure 34 contrasts the data obtained with other available geo-reference sources such as pedoanthracological and palynological records and Species Distribution Models (SDM) (Navarro-Cerrillo et al., 2006; Sánchez-Salguero, 2007; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; Gutiérrez-Hernández, 2018; Pardo-Martínez et al., 2021). The paleo-locality identified complements the paleo-biogeographical reconstruction of *Abies* conducted for the Serranía de Ronda as a whole by Pardo-Martínez et al. (2021), who found three paleo-populations with chronologies included within the Holocene. The location of these extinct populations offers us an insight as to the role that certain mountain ranges, such as Sierra del Oreganal or Sierra Palmitera, may have played as a refuge during the migration of this fir over the course of the last millennia. Both these ranges could have acted as links between the three separate disconnected Spanish fir forests existing today (Gómez-Zotano et al., 2019, 2021).

The different paleo-populations of Spanish fir discovered so far fall within the potential domain established by the models together with the other larger mountain ranges (Figure 34).

played by disturbances of natural origin in the distribution of *A. pinsapo* during the Early Holocene.

This dynamic may have accentuated during the mid-Holocene, as a result of the aridification of the Mediterranean climate about 6000 years ago (Mauri et al., 2015), and due to increasing anthropization at the beginning of the Neolithic, which from then on would be particularly important in areas near the Mediterranean coast and in the Ronda depression (Ramos-Muñoz et al., 2017; Castaño-Aguilar, 2021).

A. pinsapo seems to have declined much more sharply in recent times. Disturbances of anthropic origin would seem to be one of the main factors that help to explain the reduction of the distribution of Spanish fir to its current range (Guzmán et al., 2013; Alba-Sánchez et al., 2019). One of the main threats to the Spanish fir forests is fire (Blanca et al., 2001). The results have enabled us to identify up to 23 episodes of fire affecting *A. pinsapo* over the last 1000 years in the Serranía de Ronda (Pardo-Martínez et al., 2021).

Taken together, the pedoanthracological data indicate that the intense fragmentation and degradation of the habitat as a result of both anthropogenic activities and climate events have reduced the population of conifers (*A. pinsapo* and *P. nigra/sylvestris*-type) in Europe's Southernmost mountain refuges, and increased the risk of extinction of these taxa, so endorsing the conclusions reached for other Iberian conifers (Linares & Carreira, 2009; Sánchez-Salguero et al., 2017). They also enable us to confirm the hypothesis regarding the migration of certain conifers, such as *A. pinsapo* and *P. nigra/sylvestris*-type, to higher altitudes in Sierra Blanca (in shady areas) and by extension, in the Western Baetic System during the Pleistocene-Holocene transition. The Serranía de Ronda may have formed the southwestern boundary of certain high-elevation pine forests during the Holocene, before the continuous climatic oscillations of the last millennia and anthropic-related disturbances caused its definitive decline at the southwestern end of the Baetic System, where it was reduced to its current distribution range (Catalan-Bachiller, 1991; Castro et al., 2005).

In this way, the regressive dynamics experienced by the high-elevation pine forests in the Serranía de Ronda, which may possibly have resulted in their local extinction would be an excellent indicator of the vulnerability of other relict species such as *A. pinsapo* (Camarero et al., 2015; Talluto et al., 2017), a species which has already moved to higher altitudes due to climate change, leading to the contraction of its already reduced natural distribution area (González-Hernández et al., 2021).

At the same time, the pedoanthracological evidence confirms the native character of *P. pinaster* on the ultramafic soils of Sierra Bermeja (bordering on Sierra Blanca), considered a refuge area for this taxa during the Last Glacial Maximum (Olmedo-Cobo et al., 2019ab), formations of which may have occupied the sunny hillsides of Sierra Blanca together with other edapho-xerophile communities of *P. halepensis* and *J. phoenicea*.

In addition, the dates obtained from the radiocarbon dating of 15 fragments of charcoal from Sierra Blanca offer an exceptional framework of reference to enhance our knowledge of the geohistory of forest fires in the south-western end of the Baetic System, with high spatial and temporal resolution (Carracedo-Martín et al., 2017). All of this in an area for which there is a marked lack of information on this question, as can be deduced from Harrison et al. (2021), Global Paleofire Database (2022) and Sweeney et al. (2022), unlike other mountain systems in the North and centre of the Iberian Peninsula (Perez-Obiol et al., 2016; López-Sáez et al., 2018).

The dissemination of the data obtained would reinforce the proposals made by Gómez-Zotano et al. (2017), Olmedo-Cobo et al. (2019ab) and Pardo-Martínez et al. (2021) for the creation of an ecological corridor for *A. pinsapo*, complementing and broadening the Green Corridor for the Spanish Fir proposed by Gavira (2006), designed to connect the calcicolous Spanish firs in the Sierra de las Nieves National Park and the Sierra de Grazalema Natural Park. Together with the discovery of very ancient charcoal fragments of *Abies* in the Sierra del Oreganal—as the principal nexus joining the two enclaves—the existence of ancient Spanish fir populations in Sierra Blanca and Sierra Palmitera raises the possibility of extending this ecological network to include the peridotite sector of the Serranía de Ronda (Gómez-Zotano et al., 2021). In this way it would be possible to connect the three separate, disjointed forest masses of Spanish fir, so guaranteeing greater viability of ecosystems that are very sensitive to the current process of global change (López-Quintanilla, 2013). The implementation of these proposals would help secure the recovery of forests that have been affected by fire for thousands of years, as well as enhancing the habitats that sustain species such as the fir. This ecological corridor would reduce the isolation of local populations and would enhance the genetic exchange between the populations and the genetic variability. It would enable the supplementation of small populations in decline and would allow the recolonization of habitats and the re-establishment of populations in areas that have suffered episodes of local extinction. It would also help maintain a much greater wealth and diversity of native species and would provide a habitat, refuge and other necessary resources for numerous wild species (Quiroga & Abad, 2014; UNEP, 2019; Hilty, 2020).

In addition, the data obtained could enable the reintroduction of extinct high mountain pine forests (*P. nigra* or *P. sylvestris*), in those places in which evidence has been found of their previous presence. All this would give Sierra Blanca an unrivalled paleo-environmental and paleo-biogeographical role in the context of the western Baetic System, which would justify the cessation of quarrying activity, the restoration of the area and its inclusion in the Spanish National Parks network.

For all these reasons, Sierra Blanca is an exceptional palaeoecological laboratory for studying the dynamics of vegetation over time, and for exploring the problems arising from environmental conservation and management policies.

12.5. Conclusions

The results of this research have enabled us to: i) determine new paleopopulations of *A. pinsapo* and *P. nigra/sylvestris*-type by analysing soil charcoal fragments, so providing new data about its ancient distribution area; ii) discover more about the Holocene dynamics of *A. pinsapo* and *P. nigra/sylvestris*-type, the factors (climatic or human) involved and the successive stages through which the high mountain coniferous forests may have passed before being confined to their current habitats; iii) compare the soil charcoal records with pollen evidences and the species distribution models, and above all the characteristics of the natural habitats and ecological niches currently occupied by these species as a basis for their conservation and adaptative management; iv) consider the extent of the interglacial refuges as sentinels for certain relict conifer species such as *A. pinsapo* and *P. nigra/sylvestris*-type, in a context in which a combination of natural and anthropic factors is threatening their survival.

Paleoecological evidence obtained in this research, once it has been compared with that information from other sources such as geohistorical, botanical and paleoenvironmental (above all paleoclimatic) and genetic studies, could be the basis for developing of strategies for the preservation and regeneration of *A. pinsapo*, as well as for the reintroduction of certain orophile pine species such as *P. nigra* or *P. sylvestris*.

These new possibilities for conservation and management could be applied in both the places where *A. pinsapo* is found today, and in others that show high potential as a future habitat for this species, as established paleoecological sources and suitability models. This involve to disseminate the results of this research to public administrations and private companies with responsibilities in the management of these emblematic forest resource. Paleo-biogeographical reconstruction of the past distribution of *A. pinsapo* could also be used to develop a model for the ecological connectivity of existing *A. pinsapo* areas, an effective tool for the future preservation of this fir and its forests.

Likewise, the first evidence of *P. nigra/sylvestris*-type discovered in the Serranía de Ronda by using analysis of the charcoal present in the soil, constitutes an unprecedented informative resource in the context of the Western Baetic Cordillera. This finding reinforces the idea of glacial refuge played by the Serranía de Ronda during the last millennia for certain conifers forests. The palaeoecological information obtained can be used as an indicator of the dynamics that certain relict mountain pine forests may experience in a context of Global Change such as the present one, helping their adaptive management.

References

- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Benito, B., Linares, J.C., Nieto-Lugilde, D. & López-Merino, L. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: a phytogeographic approach using fossil pollen data and species distribution models. *Diversity and Distributions*, 16(2), 214–228. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00636.x>

- Alba-Sánchez, F. & López-Sáez, J.A. (2013). Paleobiogeografía del pinsapo en la Península Ibérica durante el Cuaternario. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 33–52). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Alba-Sánchez, F., Abel-Schaad, D., López-Sáez, J.A., Sabariego Ruiz, S., Pérez-Díaz, S. & González-Hernández, A. (2018). Paleobiogeografía de *Abies* spp. y *Cedrus atlantica* en el Mediterráneo occidental (península ibérica y Marruecos). *Ecosistemas*, 27(1), 26–37. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1441>
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Abel-Schaad, D., Sabariego, S., Pérez-Díaz, S. et al. (2019). The impact of climate and land-use changes on the most southerly fir forests (*Abies pinsapo*) in Europe. *The Holocene*, 29(7), 1176–1188. <https://doi.org/10.1177/0959683619838>
- Alba-Sánchez, F., Abel-Schaad, D., López-Sáez, J.A., Sabariego, S., Pérez-Díaz, S. et al. (2021a). Early anthropogenic change in western Mediterranean mountains (Sierra Nevada, SE Spain). *Anthropocene*, 33(3), 100278. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100278>
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Abel-Schaad, D., Sabariego, S., Pérez-Díaz, S. et al. (2021). Dinámica de las formaciones boscosas de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. en la Sierra de las Nieves durante el Holoceno Final. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 163–181). Editorial La Serranía.
- Aura, J.E, Jordá, J.F., Pérez-Ripoll, M., Rodrigo-García, M.J., Badal-García, E. et al. (2002). The far south: the Pleistocene–Holocene transition in Nerja Cave (Andalucía, Spain). *Quaternary International*, 93-94, 19–30. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00004-6)
- Badal, E. (1991). *Aportaciones de la antracología al estudio del paisaje vegetal y su evolución en el Cuaternario reciente, en la costa mediterránea del País Valenciano y Andalucía (18.000-3.000 BP)* (Tesis Doctoral). Universitat de València.
- Blanca, G., Cabezudo, B., Hernández-Bermejo, J.E., Herrera-Maliani, C.M., Muñoz-Álvarez, J. (1999). *Libro Rojo de la flora silvestre amenazada de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Camarero, J.J., Gazol, A., Sangüesa-Barreda, G., Oliva, J. & Vicente-Serrano, S.M. (2015). To die or not to die: Early-warning signals of dieback in response to a severe drought. *Journal of Ecology*, 103, 44–57. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12295>
- Camuera, J., Jiménez-Moreno, G., Ramos-Román, M.J., García-Alix, A., Toney, J.L. et al. (2019). Vegetation and climate changes during the last two glacial-interglacial cycles in the western Mediterranean: A new long pollen record from Padul (southern Iberian Peninsula). *Quaternary Science Reviews*, 205, 86–105. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.12.013>

- Carcaillet, C. & Thion, M. (1996). Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne valley (North French Alps): methodology and preliminary data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 91(1), 399–416. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(95\)00060-7](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00060-7)
- Carracedo-Martín, V., Cunill-Artigas, R., García-Codrón, J.C., Pèlachs-Mañosa, A., Pérez-Obiol, R. & Soriano-López, J.M. (2017). Fuentes para la geografía histórica de los incendios forestales. Algunas consideraciones metodológicas. *Cuadernos Geográficos*, 56(3), 66–89.
- Carrión, J.S. (2002). Patterns and processes of Late Quaternary environmental change in a montane region of southwestern Europe. *Quaternary Science Reviews*, 21(18-19), 2047–2066. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00010-0)
- Carrión, J.S. (2012). *Paleoflora y Paleovegetación de la Península Ibérica e Islas Baleares: Plioceno-Cuaternario*. Ministerio de Economía y Competitividad, Universidad de Murcia y Fundación Séneca.
- Carrión, J.S., Fuentes, N., González-Sampériz, P., Quirante, L.S., Finlayson, J.C. et al. (2007). Holocene environmental change in a montane region of southern Europe with a long history of human settlement. *Quaternary Science Reviews*, 26(11-12), 1455–1475. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.03.013>
- Carrión, J.S., Finlayson, C., Fernández, S., Finlayson, G., Allué, E. et al. (2008). A coastal reservoir of biodiversity for Upper Pleistocene human populations: Palaeoecological investigations in Gorham's Cave (Gibraltar) in the context of the Iberian Peninsula. *Quaternary Sciences Reviews*, 27(23-24), 2118–2135. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.016>
- Carrión, J.S., Fernández, S., González-Sampériz, P., López-Merino, L., Peña, L. et al. (2015). *Cinco millones de años de cambio florístico y vegetal en la Península Ibérica e Islas Baleares*. Ministerio de Economía y Competitividad.
- Carrión, J.S., Ochando, J., Fernández, S., Munuera, M., Amorós, G. et al. (2018). Last Neanderthals in the warmest refugium of Europe: palynological data from Vanguard Cave. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 259, 63–80. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2018.09.007>
- Castaño-Aguilar, J.M. (2021). Poblamiento antiguo en los bosques de la Serranía de Ronda. En Gómez Zotano, J. & Olmedo Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 59–75). Editorial La Serranía.
- Castro, M., Morla, C. & Sainz, H. (2005). *Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica*. Editorial Planeta.

- Catalan-Bachiller, G. (1991). *Las Regiones de procedencia de Pinus sylvestris L. y Pinus nigra Arn. subsp. salzmannii (Dunal) Franco en España. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza.*
- Cobo-Simón, I., Méndez-Cea, B., Jump, A.S., Seco, J., Gallego, F.J. et al. (2020). Understanding genetic diversity of relict forests. Linking long-term isolation legacies and current habitat fragmentation in *Abies pinsapo* Boiss. *Forest Ecology and Management*, 461, 117947. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117947>
- Combourieu, N., Peyron, O., Dormoy, I., Desprat, S., Beaudouin, C. et al. (2009). Rapid climatic variability in the west Mediterranean during the last 25 000 years from high resolution pollen data. *Climate of the Past*, 5(3), 503–521. <https://doi.org/10.5194/cp-5-503-2009>
- Consejería de Medio Ambiente (2004). *Mapa de series de Vegetación de Andalucía.* Junta de Andalucía.
- Cunill, R. (2010). *Estudi interdisciplinari de l'evolució del límit superior del bosc durant el període holocènic a la zona de Plaús de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català* (Tesis Doctoral). Universidad Autònoma de Barcelona.
- EUFORGEN (2022). Species. Recuperado de <http://www.euforgen.org/especies>
- Fernández, S., Carrión, J.S., Ochando, J., González-Sampériz, P., Munuera, M. et al. (2021). New palynological data from the Late Pleistocene glacial refugium of South-West Iberia: The case of Doñana. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 290, 104431. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2021.104431>
- Finlayson, G., Finlayson, C., Giles, F., Rodríguez-Vidal, J., Carrión, J.S. et al. (2008). Caves as archives of ecological and climatic changes in the Pleistocene – The case of Gorham's cave, Gibraltar. *Quaternary International*, 181(1), 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.01.009>
- García-Esteban, L. & Guindeo, A. (1989). *Anatomía e identificación de las maderas de coníferas españolas.* AITIM.
- Gavira, O. (2006). Análisis de un corredor florístico entre los Parques Naturales Sierra de Grazalema y Sierra de las Nieves (Cádiz y Málaga, España). *Anales de Biología*, 28, 45–72.
- GLOBAL PALEOFIRE DATABASE (2022). All scores (and sites). Recuperado de <https://www.paleofire.org/index.php>
- Gómez-Zotano, J. (2004). La hojalatería en Málaga durante el siglo XVIII. *Cuadernos Geográficos*, 35(2), 43–54.
- Gómez-Zotano, J. (2006a). *Naturaleza y paisaje en la Costa del Sol Occidental.* Servicio de Publicaciones Centro de Ediciones de la Diputación de Málaga.

- Gómez-Zotano, J. (2006b). Los montes de la Costa del Sol. Sierra Bermeja y Sierra Crestellina. *Investigaciones Geográficas*, 39, 47–71. <https://doi.org/10.14198/INGEO2006.39.03>
- Gómez-Zotano, J., Alcántara-Manzanares, J., Martínez-Ibarra, E. & Olmedo-Cobo, J.A. (2016). Applying the technique of image classification in climate science: the case of Andalusia (Spain). *Geographical Research*, 54(4), 461–470. <https://doi.org/10.1111/1745-5871.12180>
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Martínez-Ibarra, E. (2017). Descubrimiento y caracterización geográfica de una depresión ultramáfica en Sierra Bermeja: nuevos datos geomorfoedáficos, fitogeográficos y paleoecológicos. *Pirineos*, 172. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172001>
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Pardo-Martínez, R. (2019). Aproximación geográfica a la Sierra Blanca de Igualeja (Serranía de Ronda). *Takurinna*, 8-9, 25–50.
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Cunill-Artigas, R. (2021). Análisis pedoantracológico y propuesta de conectividad ecológica de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. en la Red Natura 2000 de Sierra Bermeja. En Gómez Zotano, J. & Olmedo Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 237–251). Editorial La Serranía.
- Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal*. Editorial La Serranía.
- González-Hernández, A., Nieto-Lugilde, D., Peñas, J. & Alba-Sánchez, F. (2021). Lean Pattern in an Altitude Range Shift of a Tree Species: *Abies pinsapo* Boiss. *Forests*, 12(11), 1451. <https://doi.org/10.3390/f12111451>
- González-Ramón, A., Andreo, B., Ruíz-Bustos, A., Richards, D.A., López-Sáez, J.A. et al. (2012). Late Quaternary paleoenvironmental record from a sedimentary fill in Cucú Cave, Almería, SE Spain. *Quaternary Research*, 77(2), 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.12.001>
- Guerra-Merchán, A. (1998). Los suelos de la provincia de Málaga. En Rebollo-Bueno, M., Serrano-Lozano, F., Nieto-Caldera, J.M. & Cabezudo-Artero, B. (Eds.), *Itinerarios por espacios naturales de la provincia de Málaga. Una aproximación al conocimiento de su geología y botánica* (pp. 114–131). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga.
- Gutiérrez-Hernández, O. (2018). Impacto del calentamiento global en la distribución y supervivencia del pinsapo (Serranía de Ronda). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 76, 504–549. <https://doi.org/10.21138/bage.2532>
- Gutiérrez-Hernández, O., Cámara-Artigas, R. & García, L.V. (2017). Nicho ecológico y distribución geográfica del pinsapo (*Abies pinsapo* Boiss). *Takurinna*, 6-7.

- Guzmán, J.R., Catalina, M.A., Navarro-Cerrillo, R.F., López-Quintanilla, J. & Sánchez, R. (2013). Los paisajes del pinsapo a través del tiempo. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 111–158). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Harrison, S.P., Villegas-Díaz, R., Cruz-Silva, E., Gallagher, D., Kesner, D. et al. (2021). The Reading Palaeofire database: an expanded global resource to document changes in fire regimes from sedimentary charcoal records. *Earth System Science Data*, 14(3), 1109–1124. <https://doi.org/10.17864/1947.319>
- Hilty, J., Worboys, G.L., Keeley, A., Woodley, S., Lausche, B. et al. (2020). Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors. *Best Practice Protected Area Guidelines Series*, 30. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.30.en>
- Instituto Geológico y Minero de España (2007). *Atlas Hidrogeológico de la provincia de Málaga*. IGME.
- Jaquot, C. (1955). *Atlas d'anatomie des bois des conifères*. Centre Technique du Bois.
- Jalut, G., Esteban, A., Bonnet, L., Gauquelin, T. & Fontugne, M. (2000). Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(3-4), 255–290. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00075-4)
- Jaramillo, J.P., Grivet, D., Terrab, A. & (2010). The Strait of Gibraltar as a major biogeographic barrier in Mediterranean conifers: A comparative phylogeographic survey. *Molecular Ecology*, 19, 5452–5468. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04912.x>
- Jiménez-Moreno, G., García-Alix, A., Scott, R., Ramos-Román, M.J., Camuera, J. et al. (2022). Reconstruction of Past Environment and Climate Using Wetland Sediment Records from the Sierra Nevada. En Zamora, R. & Oliva, R. (Eds.), *The Landscape of the Sierra Nevada* (pp. 95–114). Springer.
- Linares, J.C. (2011). Biogeography and evolution of *Abies* (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: the roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 38(4), 619–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02458.x>
- Linares, J.C. & Carreira, J.A. (2009). Temperate-like stand dynamics in relict Mediterranean-fir (*Abies pinsapo* Boiss.) forests from southern Spain. *Annals of Forest Science*, 66, 610. <https://doi.org/10.1051/forest/2009040>
- Linares, J.C., Camarero, J.J. & Carreira, J.A. (2010). Competition modulates the adaptation capacity of forests to climatic stress: insights from recent growth decline and death in relict stands of the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *Journal of Ecology*, 98(3), 592–603. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01645.x>

- López-Quintanilla, J. (2013). *Los pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Universidad de Córdoba.
- López-Sáez, J.A., López-Merino, L. & Pérez-Díaz, S. (2008). Historia de la vegetación: una aproximación arqueopalinológica. *Antiquitas*, 20, 41–47.
- López-Sáez, J.A., Pérez-Díaz, S., Galop, D., Alba-Sánchez, F. & Abel-Schaad, D. (2018). A Late Antique Vegetation History of the Western Mediterranean in Context. En Izdebski, A. & Mulryan, M. (Eds.), *Environment and Society in the Long Late Antiquity* (pp. 83–104). Brill.
- Mander, L. & Punyasena, S. (2014). On the Taxonomic Resolution of Pollen and Spore Records of Earth's Vegetation. *International Journal of Plant Sciences*, 175(8), 931–945. <https://doi.org/10.1086/677680>
- Mauri, A., Davis, A.S., Kaplan, O. & Collins, P. (2015). The climate of Europe during the Holocene: a gridded pollen-based reconstruction and its multi-proxy evaluation. *Quaternary Science Reviews*, 112, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.013>
- Navarro-Cerrillo, R.M., Fernández, L., Blanco-Oyonarte, P., Calzado, C., López-Quintanilla, J. et al. (2006). Physiography potentiality of Spanish fir forests (*Abies pinsapo* Boiss.) in Andalucía. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 15, 137–152. <https://doi.org/10.5424/srf/200615S1-00988>
- Ochando, J., López-Sáez, J.A., Pérez-Díaz, S., Ramos-Fernández, J., Munuera, M. (2020). A new pollen sequence from southern Iberia suggesting coastal Pleistocene phytodiversity hotspot. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 281, 104281. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2020.104281>
- Olmedo-Cobo, J.A. & Gómez-Zotano, J. (2017). Los climas de la Serranía de Ronda: una propuesta de clasificación. *Takurunna*, 6-7, 23–58.
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Gómez-Zotano, J. (2019a). The native status of *Pinus pinaster* on serpentine soils: charcoal analysis and palaeoenvironmental history in Sierra Bermeja (southern Iberian Peninsula, Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*, 28, 417–432. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0701-z>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Gómez-Zotano, J. & Pardo-Martínez, R. (2019b). Aportaciones del análisis pedoantracológico al conocimiento paleoecológico de *Pinus pinaster* en el sur de España: el caso de Sierra Bermeja. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2667>
- Olmedo-Cobo, J.A., Pardo-Martínez, R. & Gómez-Zotano, J. (2021). Primeros datos sobre la composición holocena de los bosques de montaña en el Parque Natural Sierra de las Nieves (Serranía de Ronda) a partir del análisis pedoantracológico. *Boletín de la Asociación Española de Geografía*, 89. <https://doi.org/10.21138/bage.3099>

- Pardo-Martínez, R., Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). The history of *Abies pinsapo* during the Holocene in southern Spain, based on pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 31, 307–321. <https://doi.org/10.1007/s00334-021-00855-w>
- Pérez-Obiol, R., García-Codron, J.C., Pèlach, A., Pérez-Haase, A. & Soriano, J.M. (2016). Landscape dynamics and fire activity since 6740 cal yr BP in the Cantabrian region (La Molina peat bog, Puente Viesgo, Spain). *Quaternary Science Reviews*, 135, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.01.021>
- Pérez-Latorre, A.V., Navas, P., Navas, D., Gil, Y. & Cabezudo, B. (1998). Datos sobre la Flora y Vegetación de la Serranía de Ronda (Málaga, España). *Acta Botanica Malacitana*, 23, 149–191. <https://doi.org/10.24310/abm.v23i0.8557>
- Pérez-Latorre, A.V., Hidalgo-Triana, N. & Cabezudo, B. (2021). Biogeografía y bosques de la Serranía de Ronda (Cádiz-Málaga-Sevilla). En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp.11–58). Editorial La Serranía.
- Quiroga, F. & Abad, J. (2014). Los corredores ecológicos y su importancia ambiental: propuestas de actuación para fomentar la permeabilidad y conectividad aplicadas al entorno del río Cardeña (Ávila y Segovia). *Observatorio Medioambiental*, 17, 253–298. https://doi.org/10.5209/rev_OBMD.2014.v17.47194
- Ramos-Muñoz, J., Siles-Guerrero, F., Gutiérrez-López, J.M., Martínez-Enamorado, V. & Martín-Ruiz, J.A. (2017). *Actas del I Congreso internacional de historia de la Serranía de Ronda: las ocupaciones por sociedades prehistóricas, protohistóricas y de la antigüedad en la Serranía de Ronda y Béticas Occidentales*. Editorial La Serranía.
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G. et al. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Sánchez-Salguero, R. (2007). *Distribución potencial de pinsapo (Abies pinsapo Boiss.) en el Parque Natural Sierra de Grazalema: Implicaciones para la regeneración de la especie bajo cubierta de pinar* (Trabajo Profesional Fin de Carrera). Universidad de Córdoba.
- Sánchez-Salguero, R., Camarero, J., Carrer, M., Gutiérrez, E., Arben, A. et al. (2017). Climate extremes and predicted warming threaten Mediterranean Holocene firs forests refugia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(47), E10142–E10150. <https://doi.org/10.1073/pnas.17081091>
- Schweingruber, F.H. (1990). *Microscopic wood anatomy: structural variability of stems and twigs in recent and subfossil woods from Central Europe*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.

- Sweeney, L., Harrison, S. & Vander-Linden, M. (2022). Assessing anthropogenic influence on fire history during the Holocene in the Iberian Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 287, 107562. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107562>
- Serrano-Lozano, F. & Guerra-Merchán, A. (2004). *Geología de la provincia de Málaga*. Centro de Ediciones de la Diputación de Málaga.
- Talon, B., Carcaillet, C. & Thion, M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Geographie Physique et Quaternaire*, 52(2), 195–208. <https://doi.org/10.7202/004875ar>
- Talluto, M.V., Boulangeat, I., Vissault, S., Thuiller, W. & Gravel, D. (2017). Extinction debt and colonization credit delay range shifts of eastern North American trees. *Nature Ecology & Evolution*, 1, 0182. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0182>
- Thion, M. (1978). La pédoanthracologie: Une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le Néolithique. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 287, 1203–1206.
- UNEP (2019). *Frontiers 2018/19 Emerging Issues of Environmental Concern*. United Nations Environment Programme.
- Vernet, J.L., Ogereau, P., Figueiral, I., Machado, C. & Uzquiano, P. (2001). *Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents, Sud-Ouest de l'Europe: France, Péninsule ibérique et Îles Canaries*. CNRS.

13. MULTIPROXY ANALYSIS FOR THE PALEOBIOGEOGRAPHICAL RECONSTRUCTION OF THE RELICT FORESTS OF THE SERRANÍA DE RONDA DURING THE HOLOCENE (BAETIC SYSTEM, SPAIN)

Abstract

The mountains of the southern Iberian Peninsula are important biodiversity hotspots. They are also home to several relict species that are threatened with extinction in the face of global change. One of the best examples is the Serranía de Ronda, a system of mountainous reliefs located at the western end of the Baetic Cordillera. Its tree cover includes, among other unusual taxa, endemic formations such as the Spanish fir (*Abies pinsapo*) and Portuguese oak (*Quercus faginea*) forests. However, despite the ecological exceptionality of this mountainous area, little is known about its paleobiogeography. To remedy this, in this research we take a multidisciplinary approach based on the application of several different paleoecological disciplines, of which pedoanthracology is the main methodological tool. Six new soil samplings were performed, which were added to the existing pedoanthracological network, making a total of 43 soil sampling sites. The taxonomic analysis revealed several taxa, such as *Abies*, *Fraxinus*, *Pinus* and *Pinus nigra/sylvestris*-type, which are currently absent in several of the sampled sites. After contextualizing the 36 new radiocarbon dates obtained, the results confirm the antiquity of certain paleoendemic forests in the Serranía de Ronda, and the important role played by certain mountain enclaves as refuges for conifers such as *A. pinsapo* and *Pinus nigra/sylvestris*-type during the Pleistocene-Holocene transition. The dissemination of the results of this research will enable them to be implemented in the different strategies of adaptive management of the most threatened forests of the Serranía de Ronda.

Keywords: pedoanthracology; Holocene; vegetation dynamics; paleoendemic conifers; endangered species; Baetic Range.

Resumen

Las montañas del sur de la península ibérica son importantes *hotspots* de biodiversidad. También albergan varias especies relictas en peligro de extinción ante el cambio global. Uno de los mejores ejemplos es la Serranía de Ronda, un vasto conjunto fisiográfico situado en el extremo occidental de la Cordillera Bética. Su cubierta arbórea incluye, entre otros taxones singulares, formaciones endémicas como los pinsapares (*Abies pinsapo*) y quejigales (*Quercus faginea*). Sin embargo, a pesar de su excepcionalidad ecológica, apenas se tiene información acerca de la paleobiogeografía de estos y otros taxones singulares. Para subsanarlo, en esta investigación se adopta un enfoque multidisciplinar basado en la aplicación de varias disciplinas paleoecológicas, de las cuales la pedoantracología ha sido la principal herramienta metodológica. Se han realizado seis nuevos muestreos edáficos, que se añaden a la red pedoantracológica existente, lo que hace un total de 43 lugares de muestreo. El análisis taxonómico ha revelado varios taxones, como *Abies*, *Fraxinus*, *Pinus* y *Pinus* tipo *nigra/sylvestris*, que actualmente están ausentes en varios de los enclaves muestreados. Tras

contextualizar las 36 nuevas cronologías radiocarbónicas obtenidas, los resultados confirman la antigüedad de ciertos bosques paleoendémicos en la Serranía de Ronda, y el importante papel desempeñado por ciertos enclaves montañosos como refugios de coníferas como *A. pinsapo* y *Pinus* tipo *nigra/sylvestris* durante la transición Pleistoceno-Holoceno. La transferencia de los resultados derivados de esta investigación permitirá su aplicación en las diferentes estrategias de gestión adaptativa de los bosques de la Serranía de Ronda.

Palabras clave: pedoantracología; Holoceno; dinámica de la vegetación; coníferas paleoendémicas; especies amenazadas; Cordillera Bética.

13.1. Introduction

The Mediterranean bioclimatic region is the second most important biodiversity hotspot in the world, with as many as 25 000 plant species (Myers et al., 2000; Médail & Myers, 2004). This exceptional ecological richness is the result of a very long and complex biogeographical history (Rey-Benayas et al., 2002; Molina-Venegas et al., 2017). In this sense the location of the mountain ranges in Europe, especially those situated in the southern part, in a transition zone between temperate and tropical climates, has played a fundamental role in the evolution of certain plant taxa during different historical periods as refugia for flora and as a bridge between the continents of Africa and Europe (Médail & Quézel, 1997; Médail & Diadema, 2009).

Together with this, the Mediterranean basin has since time immemorial been a leading centre of human settlement and development, which has had a significant negative impact on this inherited biological wealth (Blondel, 2006). The imprint of humanity on the plant cover intensified during the Neolithic (Carrión, 2012), a period in which the environmental conditions of the Holocene period began to improve (Jalut et al., 2000).

At the same time, the western Mediterranean is currently one of the most vulnerable regions on Earth in the face of global change (Cramer et al., 2018). Its mountains are expected to have to withstand greater exposure to environmental changes than other mountain areas of the planet (Thuiller et al., 2005; Giorgi, 2006). This problem will have an even greater impact on the Iberian Peninsula, one of the main centres of plant diversity with more than 6000 plant taxa, of which about 22 % are endemic (Aedo et al., 2017).

Within the Baetic Cordillera, one of the most outstanding mountain ranges in this sense is the Serranía de Ronda (western Baetic Range), a vast mountain territory with large areas of forest. Its forests are made up of formations of conifers (pines and firs) and of broad-leaved (cork oaks, Portuguese oaks, holm oaks and riparian trees), which together form a vegetation landscape of great ecological value in which man has played a decisive role (Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021). As a result, there has been a lot of recent research into the current situation of certain taxa (López-Quintanilla, 2013; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021). This includes studies of their habitat, references from historical sources or species distribution models (SDM), varied approaches that provide an important body of information about the recent dynamics and

the current state of certain plant formations. This information has also served as a framework of reference for the different conservation and forestry restoration policies carried out in recent years in this part of the Baetic Cordillera.

However, these approaches offer a very limited temporal resolution, which means that our knowledge of the evolutionary dynamics of the plant landscape in the Serranía de Ronda is sketchy (Gómez-Zotano et al., 2017; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021). There are very few reconstructions over a broad timeframe which enable us to identify the different factors that may have favoured the adaptation, fragmentation and extinction of certain plant taxa (Alba-Sánchez et al., 2018, 2019; Pardo-Martínez et al., 2021). All of this in spite of the proven value of paleoecological sources for forest conservation and management purposes (Robin et al., 2013; Carracedo-Martín et al., 2017), especially when combined with data obtained from ecological monitoring (Davies & Bunting, 2010).

These paleoecological sources include for example the study of pollen microremains, although there have been very few analyses of this kind in the areas where the Spanish fir currently grows (Alba-Sánchez et al., 2019). Another innovative method is pedoanthracology, the study of non-archaeological soil charcoals, an important approach given that fire has been one of the main agents modelling the plant landscape over the course of history, and is a key element for explaining the great diversity of species associated with the Mediterranean climate (Bond & Keeley, 2005). This technique has been successfully applied in the mountains in the north and centre of the Iberian Peninsula. Cunill (2010) and Cunill et al. (2012, 2013) pioneered the application of pedoanthracology in the Pyrenees, while García-Álvarez et al. (2017) did likewise in the Central System. For their part, Beato-Bergua et al. (2019) applied this technique to the study of *Taxus baccata* in the Asturian Massif Central (Cantabrian Mountains). Research of this kind in our study area in the south of the Iberian Peninsula began more recently (Gómez-Zotano et al., 2017; Pardo-Martínez, 2020). In this context, the Baetic Cordillera is an excellent laboratory for the study of the spatial and temporal components of global change and the processes it entails. This analysis also provides complementary perspectives which enable a paleoclimatic and paleo-environmental interpretation to be performed (Cunill et al., 2013; Saltré et al., 2013).

The main objective of this research was to obtain a first overview of the composition and dynamics of the forests of the Serranía de Ronda. To this end, in this study we adopted a multi-proxy approach to this question based on the application of different paleoecological disciplines, of which pedoanthracology is the main methodological tool. Over the course of this research, we discovered taxa that once grew in sampling sites where they are no longer present today. This information, contextualized with 36 new radiocarbon dates in addition to the 74 that had previously been obtained, has provided revealing data on the composition and dynamics of the forests of the Serranía de Ronda at different times during the Holocene. It highlights the role played by various mountain enclaves as refuges for certain species of conifer –and in particular of *Abies pinsapo* and *Pinus nigra/sylvestris*-type– after the Last Glacial Maximum. The

dissemination of the results of this research will enable their implementation in different strategies for the conservation and adaptive management of the most endangered forests and their habitats in the Serranía de Ronda.

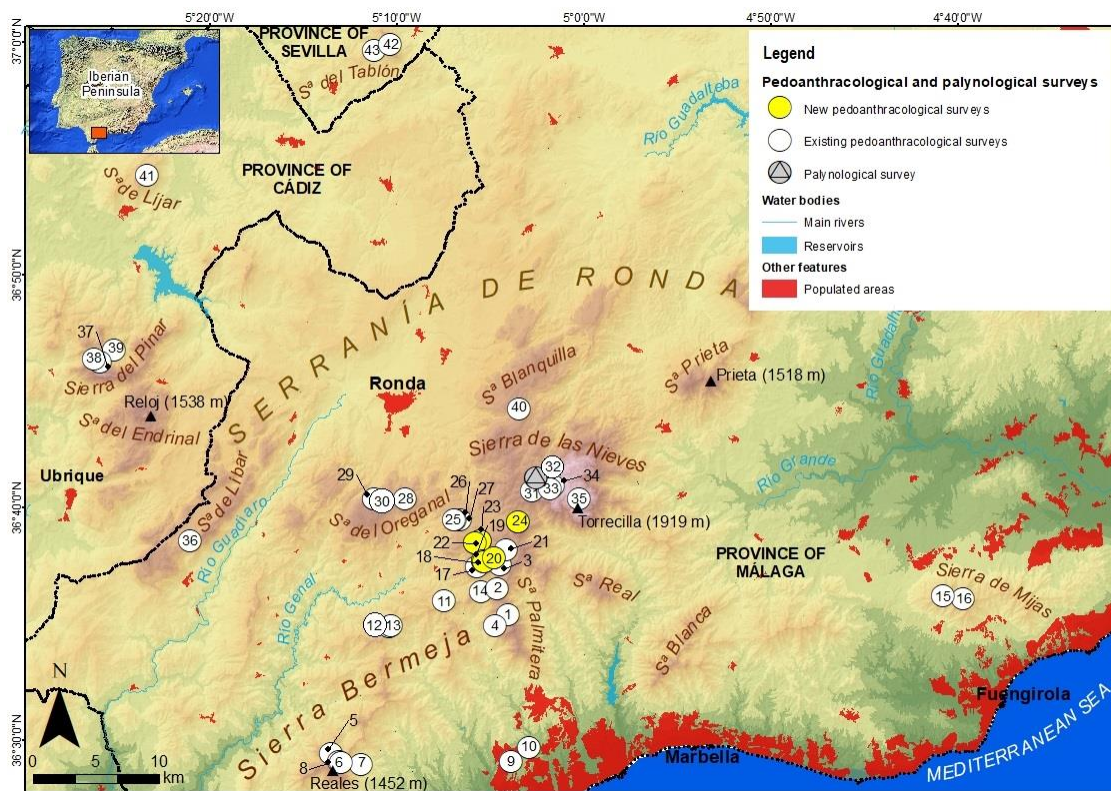
13.2. Methods

13.2.1. Study area

The Serranía de Ronda (Figure 35) is located in the extreme south-west of the Baetic Cordillera (in the provinces of Cádiz, Málaga and Sevilla). It is a natural, mountainous, densely forested area, which hosts a wide variety of plant species due to the particular combination of Mediterranean climate, orography and rocky outcrops (Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021).

Figure 35. Sampling sites on the topographic map of the study area. Pedoanthracological sampling sites:

- 1) Palmerita 1, 2) Palmerita 2, 3) Palmerita 3, 4) Palmerita 4, 5) Los Reales 1, 6) Los Reales 2, 7) Los Reales 3, 8) Los Reales 4, 9) Arroyo del Toro, 10) Majada del Toro, 11) Puerto del Hoyo, 12) Jardón 1, 13) Jardón 2, 14) Cerro de los Sauces, 15) Cerro Barretos, 16) Puerto de la Encina, 17) Cascajares 1, 18) Cascajares 2, 19) Cascajares 3, 20) Cascajares 4, 21) Fuenfría Alta, 22) Arroyo de los Lobos 1, 23) Arroyo de los Lobos 2, 24) La Nava, 25) Navacillo 1, 26) Navacillo 2, 27) Navacillo 3, 28) Cancha de Almola, 29) Jarastepar 1, 30) Jarastepar 2, 31) Cañada del Cuerno, 32) Cañada de Enmedio, 33) Pilonos 1, 34) Pilonos 2, 35) Puerto de los Valientes, 36) Sierra de los Pinos, 37) Sierra del Pinar 1, 38) Sierra del Pinar 2, 39) Llanos de Rabel, 40) Puerto de Lifa, 41) Lijar, 42) Tablón, 43) Terril. Yellow spots mark the new sampling sites carried out during the present study. Palynological survey: Cañada de las Ánimas (grey spot).



Source: own elaboration from data collected by Olmedo-Cobo et al. (2021) and Pardo-Martínez et al. (2021).

Within this territory, as established by Pérez-Latorre et al. (2021), there are at least four functional groups of forests (evergreen, marcescent, conifers and deciduous riparian), which in turn can be divided into 12 main forest types, that are represented by species such as: holm oaks (*Quercus rotundifolia*), cork oaks (*Quercus suber*), carobs (*Ceratonia siliqua*), Portuguese oaks (*Quercus faginea*), oaks (*Quercus pyrenaica*), pines (*Pinus pinaster*), firs (*Abies pinsapo*), poplars (*Populus alba*), alders (*Alnus glutinosa*), elms (*Ulmus minor*), ash trees (*Fraxinus angustifolia*) and willows (*Salix pedicellata*). These are distributed across the territory in different ways depending on the litho-edaphic and bioclimatic conditions. Together they form a plant landscape in which humans have played a fundamental role in the past and present distribution of the forest canopy (Castillo-Rodríguez, 2000; Castañeda-Fernández, 2008; Alba-Sánchez et al., 2019; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021).

From a biogeographical point of view, most of the study area falls within the Baetic province (Rondeño, Bermejense and Antequerano sectors) with certain smaller areas belonging to the Tingitano-Onubo-Algarviense province (Aljibico subsector) (Pérez-Latorre et al., 1998, 2019; Rivas-Martínez, 2011). The floristic singularity of this territory is completed by the fact that it hosts an important number of endemic and/or endangered taxa of which the most significant are: *A. pinsapo*, *Q. faginea* subsp. *alpestris*, *Atropa baetica*, *Narcissus bugei*, *Sarcocapnos baetica* subsp. *baetica*, *Saxifraga bourgeana*, *Stahelina baetica*, *Ilex aquifolium* and *Taxus baccata* (Pérez-Latorre et al., 2021).

13.2.2. Methodology

In order to carry out the multiproxy analysis on which this research is based, various different methodologies were applied, such as palynology, historical references, species distribution models (SDM) and pedoanthracological analysis. This last procedure was the main methodological tool applied, based on protocols defined by Talon et al. (1998) and adapted by Cunill (2010) and Cunill et al. (2013). The work was divided into the following phases:

1. Fieldwork. During this phase of the work a total of 6 new soil sampling sites were excavated in different parts of the Serranía de Ronda: Arroyo de los Lobos 1 and 2, Cascajares 2, 3 and 4, and La Nava. These were in addition to the 37 existing ones (see Olmedo-Cobo et al., 2021; Pardo-Martínez et al., 2021) (Figure 35). This brings the network of pedoanthracological sampling sites for the Serranía de Ronda as a whole to 43. We then described the edaphic profile of each sample, having differentiated between 2 (II) and 8 (VIII) levels. Between 3 and 15 kg of soil samples were taken for each of these levels.

2. Laboratory work. The second phase, carried out in our laboratory, involved the following tasks:

- a. Sieve, while damp, the soil samples collected in the field. For this purpose, standardized 50 cm sieves were used with mesh gaps of 0.8, 2 and 5 mm. Once they had been sieved, each sample was dried in the open air.

b. Weighting the residual samples. The lithological fragments of more than 5 mm –from each of the sampling levels established–, were weighed in order later to calculate the anthracomass. They were then discarded.

c. Separation of the charcoals. Manual selection of the charcoal using a binocular loupe.

d. Taxonomic identification. Once selected, the taxon of each charcoal was identified using an Olympus BX51 reflected light optical microscope (x50-400). The maximum number of fragments identified by sampling level was 100 units. The taxa of the charcoal fragments were identified by consulting several atlases of comparative wood anatomy (Schweingruber, 1990; Vernet et al., 2001).

e. Radiocarbon dating. 36 charcoal fragments from different taxa were subjected to radiocarbon dating in the following specialized laboratories: Poznan Radiocarbon Laboratory (Poznan, Poland) and the Alfred-Wegener-Institut (Bremerhavem Germany). These 36 charcoal fragments consisted of 13 fragments of *Pinus* sp., 9 of *P. nigra/sylvestris*-type, 7 of *Abies* sp., 4 of *Pinus pinaster* and 3 of *Quercus* sp. Later, the dated samples were calibrated using Oxcal 4.3 software and the IntCal20 database (Reimer et al., 2020), 2 sigma (95 % probability).

The pedoanthracological sampling was complemented with a palynological analysis at one of the sampling points. In this case, the sediment core, measuring 235 cm, was collected using a Rolatec RL-48-L drill equipped with a hydraulic piston. The C¹⁴ datings (10 in total) were performed using accelerator mass spectrometry (AMS) at the Scottish Universities Environmental Research Centre (United Kingdom). The samples were treated according to the chemical methodology proposed by Faegri & Iversen (1989), which comprises an initial attack with HCl and subsequent washings with NaOH. The sediment was then concentrated in heavy liquid in order to separate pollen and non-pollen palynomorphs (Goeury & De Beaulieu, 1979), and finally treated with HFl. Pollen concentration was estimated by adding a Lycopodium tablet to each sample (Stockmarr, 1971; Faegri and Iversen, 1989).

At the same time, we reviewed all the palynological studies conducted to date in the western sector of the Baetic Cordillera. This biogeographical study was complemented with analysis of both the historical sources with a timescale dating back to the 16th century and the available SDMs (Navarro-Cerrillo et al., 2006; Sánchez-Salguero, 2007; Alba-Sánchez et al., 2010; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; López-Tirado & Hidalgo, 2014; Gutiérrez-Hernández, 2018). This enabled us to obtain paleoecological and prospective information about the different tree taxa present in the Serranía de Ronda.

13.3. Results and discussion

13.3.1. Pedoanthracological analysis

The 6 new soil samplings conducted in our latest research are in addition to those carried out in the Serranía de Ronda over the last few years. This brings the number of pedoanthracological

sampling sites to 43. This extensive network enabled us to obtain a large volume of charcoal fragments.

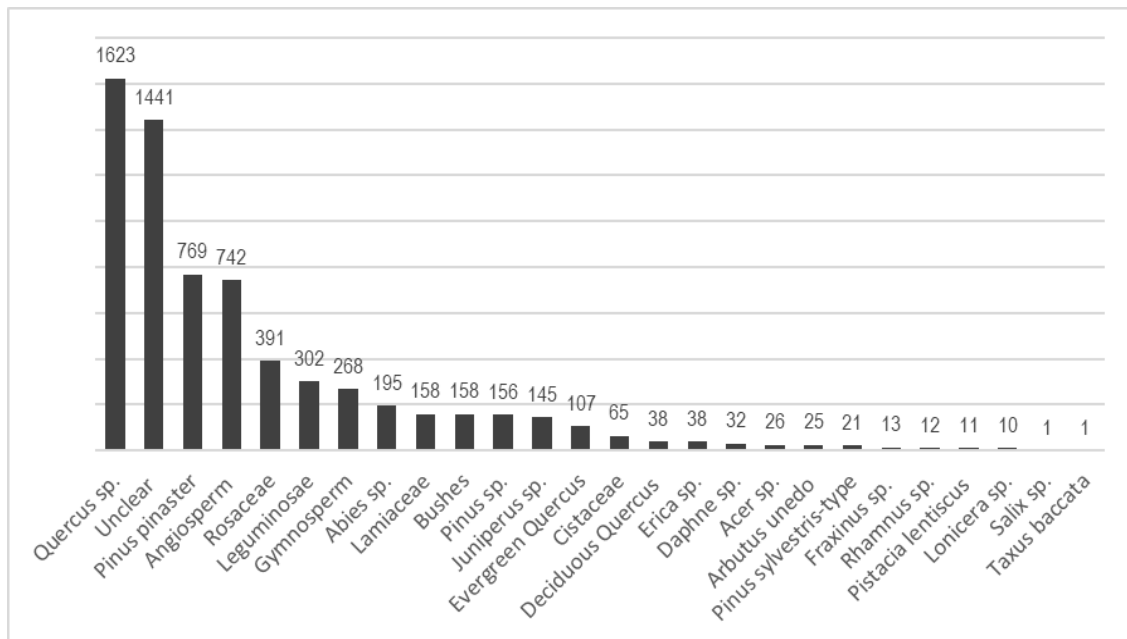
The anthracomass values showed great diversity, with very low values being found at Cascajares 3 (66 mg/kg) and very high values at Arroyo de los Lobos 2 (8337 mg/kg). In other locations in the Serranía de Ronda the dynamics are similar, as shown by Olmedo-Cobo et al. (2021) and Pardo-Martínez et al. (2021). In this respect, we found some sites with very low anthracomass values, such as Majada del Toro (1.4 mg/kg), Lijar (5.2 mg/kg) and Jarastepar 2 (9.3 mg/kg), and others with very high anthracomass values, such as Palmitera 2 (7066.3 mg/kg), Palmitera 3 (7831.6 mg/kg) or Palmitera 1 (137 379.3 mg/kg).

A total of 1040 charcoal fragments were subjected to taxonomical analysis. 85 % (884 samples) of these fragments were validly identified. An additional 5.3 % of the samples analysed could only be identified as angiosperms, while gymnosperms accounted for 1.3 %. In the remaining 8.7 % of the samples (85 fragments) we were unable to make any taxonomic classification whatsoever, due to processes of structural deformation, vitrification and/or the presence of fungi. These new samplings brought the total number of fragments identified in all 43 sampling sites in the Serranía de Ronda pedoanthracological network to 6751. Of these, 63.6 % (4297 samples) were successfully identified, while a further 11 % could only be identified as angiosperms and 4 % as gymnosperms. Taxonomic identification proved impossible in 21.3 % of the samples (1441 fragments).

By taxa, the most common was the *Quercus* genus, with 26.2 %, in line with the results obtained by Olmedo-Cobo et al. (2021) and Pardo-Martínez et al. (2021). In the Serranía de Ronda as a whole, this genus accounts for 26.2 % of all the fragments and was present in 37 of the 43 sampling sites. Families such as rosaceae and leguminosae accounted for 26.1 % and 12.4 % of the taxonomic identifications, respectively (5.8 % and 4.5 % considering the entire pedoanthracological network). Other taxa, such as *Pinus* (5.8 %), ericaceae (2.9 %), *Pinus nigra/sylvestris*-type (2 %), *Rhamnus* (1 %) and *Abies* (0.1 %), had much lower percentages. Taxonomic diversity increases significantly in the Serranía de Ronda as a whole, including, in addition to those already mentioned, genera such as *Acer*, *Arbutus*, *Daphne*, *Erica*, *Fraxinus*, *Lonicera*, *Pistacia*, *Salix* and *Taxus*. In any case, these accounted for just 2.4 % of all the validly identified fragments (Figure 36).

In general, the taxa identified in this study coincide with the plant species growing today in the different localities analysed. However, in certain enclaves we identified taxa that are no longer present today. These include for example the charcoal fragments of relict conifers such as *Abies* sp. found in Arroyo de los Lobos 2; *Pinus* sp. in Cascajares 1; and *P. nigra/sylvestris*-type in Arroyo de los Lobos 1 and Cascajares 4.

Figure 36. Absolute frequency of identified taxa (n° of charcoal fragments) for the Serranía de Ronda as a whole.






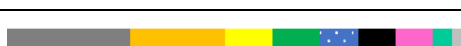


























Source: based on data collected by Olmedo-Cobo et al. (2021) and Pardo-Martínez et al. (2021).

These results are in addition to the ancient populations previously identified by Olmedo-Cobo et al. (2021) and Pardo-Martínez et al. (2021) in other locations in the Serranía de Ronda, such as *Abies* sp. in Palmitera 1, Jarastepar 2, Fuenfría Alta; and *Pinus* sp. in Puerto de los Valientes, Cañada del Cuerno, Sierra del Pinar 1, Jarastepar 2 and Tablón.

In Cañada de Enmedio, for its part, fragments from deciduous genera such as *Fraxinus* and *Salix* (Table 12, Figure 37) were found by Olmedo-Cobo et al. (2021).

Table 12. Anthracomass values and taxonomic identifications for each of the pedoanthracological samplings conducted in the Serranía de Ronda as a whole.

Samplings carried out during the present investigation			
Sites	Anthracomass (mg/kg)	Taxa identified	Identified taxa currently absent
Arroyo de los Lobos 1	124.5		<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type
Arroyo de los Lobos 2	8337		<i>Abies</i> sp.
Cascajares 2	151.7		---
Cascajares 3	66		---
Cascajares 4	211.1		<i>Pinus nigra/sylvestris</i> -type
La Nava	118.8		---
Samplings carried out in previous investigations			
Sites	Anthracomass (mg/kg)	Taxa identified	Identified taxa currently absent
Arroyo del Toro	15.3		---

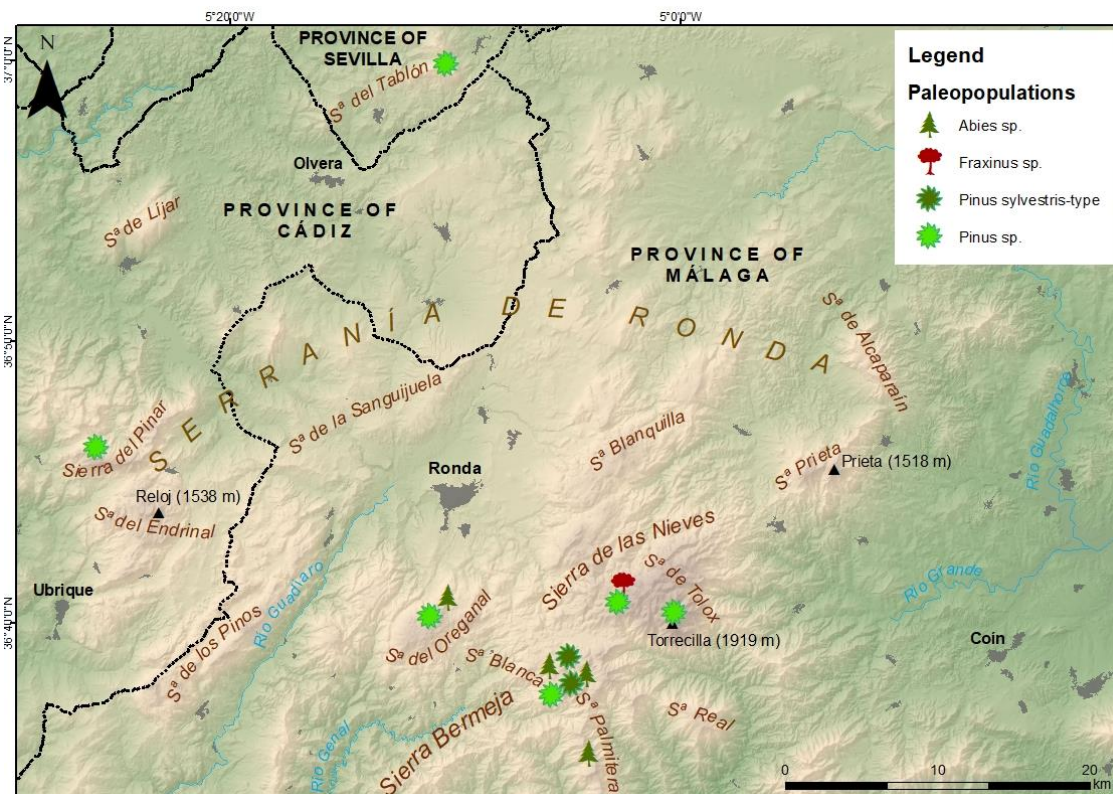
Cancha de Almola	25.7		---
Cañada de Enmedio	1039.4		<i>Fraxinus sp.</i>
Cañada del Cuerno	27.5		<i>Pinus sp.</i>
Cascajares 1	17.6		<i>Pinus sp.</i>
Cerro Barretos	1461.1		---
Cerro de los Sauces	287.5		---
Fuenfría Alta	651.7		<i>Abies sp.</i>
Jarastepar 1	25		---
Jarastepar 2	9.3		<i>Abies sp. and Pinus sp.</i>
Jardón 1	289.5		---
Jardón 2	185.2		---
Líjar	5.2		---
Llanos de Rabel	80.3		---
Los Reales 1	1965		---
Los Reales 2	2115.2		---
Los Reales 3	197.1		---
Los Reales 4	98.4		---
Majada del Toro	1.4		---
Navacillo 1	39.7		---
Navacillo 2	22		---
Navacillo 3	136.5		---
Palmitera 1	137,379.3		<i>Abies sp.</i>
Palmitera 2	7066.3		---
Palmitera 3	7831.6		---
Palmitera 4	99.6		---
Pilones 1	118.4		---
Pilones 2	143		---
Puerto de la Encina	234.3		---
Puerto de Lifa	9.6		---
Puerto de los Valientes	475.7		<i>Pinus sp.</i>

Puerto del Hoyo	413.7		---
Sierra de los Pinos	30.8		---
Sierra del Pinar 1	8285		<i>Pinus sp.</i>
Sierra del Pinar 2	129.8		---
Tablón	186.4		<i>Pinus sp.</i>
Terril	49.7		---

Legend					
<i>Abies sp.</i>		<i>Pinus pinaster</i>		<i>Salix sp.</i>	
<i>Acer sp.</i>		<i>P. nigra/sylvestris-type</i>		<i>Taxus baccata</i>	
<i>Fraxinus sp.</i>		<i>Quercus sp.</i>		Other categories	
<i>Juniperus sp.</i>		Deciduous <i>Quercus</i>		Angiosperm	
Leguminosae		Evergreen <i>Quercus</i>		Gymnosperm	
<i>Pinus sp.</i>		Rosaceae		Unclear	

Source: own elaboration on the basis of data compiled by Olmedo-Cobo et al. (2021) and Pardo-Martínez et al. (2021).

Figure 37. Ancient populations of different tree taxa found in this research, and in the Serranía de Ronda as a whole.



Source: own elaboration on the basis of data compiled by Olmedo-Cobo et al. (2021) and Pardo-Martínez et al. (2021).

A total of 36 new radiocarbon dates were obtained, in addition to the 74 obtained previously for the Serranía de Ronda as a whole (see Olmedo-Cobo et al., 2019, 2021; Pardo-Martínez et al., 2021). The chronologies range from 14 013-13 440 to 235 years cal. BP (Table 13).

Table 13. Ages obtained for 110 charcoal fragments subjected to radiocarbon C¹⁴ dating.

Radiocarbon dates obtained during the present investigation				
PALMITERA 1				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Pinus pinaster</i>	5181.1.1	V (52-80)	7236 ± 103	8385–7932
<i>Pinus pinaster</i>	5178.1.1	III (21-32)	6847 ± 36	7853–7678
<i>Pinus pinaster</i>	5180.1.1	V (52-80)	6794 ± 33	7751–7856
<i>Pinus pinaster</i>	5179.1.1	IV (32-52)	4760 ± 33	5660–5403
PUERTO DE LOS VALIENTES				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Abies</i> sp.	6247.1.1	I (0-18)	3072 ± 17	3428–3297
<i>Abies</i> sp.	6248.1.1	III (56-85)	1597 ± 59	1748–1424
<i>Abies</i> sp.	6246.1.1	I (0-18)	1135 ± 16	1239–1040
JARASTEPAR 2				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Pinus</i> sp.	6245.1.1	II (21-55)	10059 ± 96	11 976–11 337
<i>Pinus</i> sp.	6242.1.1	I (0-21)	10006 ± 93	11 888–11 311
<i>Pinus</i> sp.	5164.1.1	I (0-21)	9782 ± 42	11 327–11 227
<i>Pinus</i> sp.	6244.1.1	I (0-21)	9675 ± 97	11 311–10 801
<i>Pinus</i> sp.	6243.1.1	I (0-21)	9126 ± 22	10 422–10 297
SIERRA DEL PINAR 1				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Pinus</i> sp.	5168.1.1	III (20-44)	145 ± 20	310–126
<i>Abies</i> sp.	5167.1.1	III (20-44)	132 ± 20	280–80
<i>Abies</i> sp.	5166.1.1	III (20-44)	127 ± 22	280–80
<i>Abies</i> sp.	5165.1.1	III (20-44)	136 ± 23	276–77
CAÑADA DEL CUERNO				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Pinus</i> sp.	6241.1.1	II (23-36)	3630 ± 16	4119–3956
CASCAJARES 1				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Pinus</i> sp.	6253.1.1	III (81-112)	9261 ± 88	10 311
<i>Pinus</i> sp.	6251.1.1	III (81-112)	9153 ± 97	10 234
<i>Pinus</i> sp.	6252.1.1	III (81-112)	8583 ± 94	9494
<i>Pinus</i> sp.	6250.1.1	II (51-81)	7473 ± 84	8234–8110
<i>Pinus</i> sp.	6249.1.1	I (0-51)	139 ± 56	236
TABLÓN				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Pinus</i> sp.	6256.1.1	III (33-64)	11767 ± 108	14 013–13 440
<i>Quercus</i> sp.	6255.1.1	III (33-64)	8594 ± 22	9643–9566
<i>Quercus</i> sp.	6254.1.1	III (33-64)	151 ± 54	235
TERRIL				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Quercus</i> sp.	6257.1.1	III (60-93)	1560 ± 16	1500–1455
ARROYO DE LOS LOBOS 1				

Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>P. nigra/sylvestris</i> -type	7990.1.1	III (32-55)	9560 ± 124	10 645
ARROYO DE LOS LOBOS 2				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Abies</i> sp.	6792.1.1	III (17-39)	108 ± 23	289–94
CASCAJARES 4				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>P. nigra/sylvestris</i> -type	7992.1.1	II (15-45)	7472 ± 26	8352–8267
<i>P. nigra/sylvestris</i> -type	7997.1.1	III (45-96)	7473 ± 25	8352–8267
<i>P. nigra/sylvestris</i> -type	7993.1.1	II (15-45)	7352 ± 25	8339–8103
<i>P. nigra/sylvestris</i> -type	6793.1.1	III (45-96)	7361 ± 23	8333–8103
<i>P. nigra/sylvestris</i> -type	7996.1.1	II (15-45)	7405 ± 28	8244–8134
<i>P. nigra/sylvestris</i> -type	7995.1.1	II (15-45)	7386 ± 25	8238–8112
<i>P. nigra/sylvestris</i> -type	7998.1.1	III (45-96)	7335 ± 25	8105
<i>P. nigra/sylvestris</i> -type	7994.1.1	II (15-45)	7300 ± 104	8013
Radiocarbon dates obtained in previous investigations				
PALMITERA 1				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Abies</i> sp.	5173.1.1	V (52-80)	8707 ± 37	9931–9616
<i>Abies</i> sp.	5174.1.1	V (52-80)	8573 ± 35	9719–9551
<i>Abies</i> sp.	5176.1.1	V (52-80)	8549 ± 36	9552
<i>Abies</i> sp.	5175.1.1	V (52-80)	8300 ± 40	9266–9206
<i>Abies</i> sp.	5177.1.1	V (52-80)	8155 ± 39	9245–9076
<i>Abies</i> sp.	5170.1.1	V (52-80)	8003 ± 128	9236–8615
<i>Abies</i> sp.	5171.1.1	V (52-80)	8057 ± 111	8672
<i>Abies</i> sp.	Poz-83921	V (52-80)	7300 ± 50	8342–8053
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-78857	V (52-80)	7300 ± 40	8092
<i>Abies</i> sp.	5169.1.1	IV (32-52)	7142 ± 34	8001–7944
<i>Abies</i> sp.	Poz-78851	IV (32-52)	6480 ± 40	7516–7356
<i>Abies</i> sp.	5172.1.1	V (52-80)	6239 ± 35	7224–7085
<i>Abies</i> sp.	Poz-78852	IV (32-52)	5710 ± 40	6651–6473
<i>Abies</i> sp.	Poz-83920	V (52-80)	5840 ± 40	6607–6573
<i>Abies</i> sp.	Poz-83922	IV (32-52)	5770 ± 40	6553–6523
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-78854	IV (32-52)	4965 ± 35	5899–5668
<i>Abies</i> sp.	Poz-83924	IV (32-52)	4605 ± 35	5441–5145
<i>Quercus</i> sp.	Poz-78850	II (9-21)	50 ± 30	295–103
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-78849	I (0-9)	70 ± 30	293–101
<i>Quercus</i> sp.	Poz-78929	III (21-32)	90 ± 30	289–94
<i>Quercus</i> sp.	Poz-78853	IV (32-52)	120 ± 30	279–79
<i>Quercus</i> sp.	Poz-78856	V (52-80)	135 ± 30	254–77
<i>Quercus</i> sp.	Poz-78848	I (0-9)	140 ± 30	242–76
CANADA DE ENMEDIO				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Acer</i> sp.	Poz-113830	III (30-45)	955 ± 30	998–865
Deciduous <i>Quercus</i>	Poz-113272	III (30-45)	890 ± 30	979–802
Deciduous <i>Quercus</i>	Poz-113273	III (30-45)	825 ± 25	852–760
<i>Fraxinus</i> sp.	Poz-113271	III (30-45)	825 ± 30	750
<i>Acer</i> sp.	Poz-113832	II (11-30)	480 ± 30	612–568

<i>Abies</i> sp.	Poz-113828	III (30-45)	200 ± 30	326–208
<i>Abies</i> sp.	Poz-113846	I (0-11)	180 ± 30	322–137
<i>Abies</i> sp.	Poz-113848	II (11-30)	180 ± 30	322–137
<i>Abies</i> sp.	Poz-113827	II (11-30)	170 ± 30	320–131
<i>Abies</i> sp.	Poz-113270	I (0-11)	50 ± 30	295–103
<i>Abies</i> sp.	Poz-113784	II (11-30)	15 ± 30	295–103
<i>Abies</i> sp.	Poz-113847	II (11-30)	80 ± 30	291–79
<i>Abies</i> sp.	Poz-113829	II (11-30)	115 ± 30	280–80
<i>Abies</i> sp.	Poz-113826	II (11-30)	125 ± 30	276–78
LOS REALES 1				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Abies</i> sp.	Poz-83919	III (36-61)	8860 ± 50	9810
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-78861	II (10-36)	6200 ± 40	7274–7052
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-78886	III (36-61)	6070 ± 40	7197–6863
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-78862	III (36-61)	6170 ± 40	7017
<i>Abies</i> sp.	Poz-83918	II (10-36)	6160 ± 40	7014
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-83916	III (36-61)	6140 ± 40	7006–6974
<i>Abies</i> sp.	Poz-78858	I (0-10)	200 ± 30	326–208
<i>Abies</i> sp.	Poz-78859	I (0-10)	195 ± 30	325–143
<i>Abies</i> sp.	Poz-78885	I (0-10)	60 ± 30	294–102
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-78860	I (0-10)	110 ± 30	282–82
LOS REALES 2				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Abies</i> sp.	Poz-82525	IV (33-52)	3270 ± 30	3516–3476
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-83915	I (0-7)	2895 ± 30	3011
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-82528	III (18-33)	2405 ± 30	2715–2419
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-82524	IV (33-52)	1955 ± 30	2220–2031
<i>Pinus pinaster</i>	Poz-82526	IV (33-52)	2005 ± 30	2135–2104
<i>Abies</i> sp.	Poz-82527	III (18-33)	1800 ± 30	1832–1674
<i>Abies</i> sp.	Poz-83914	I (0-7)	45 ± 30	295–103
<i>Abies</i> sp.	Poz-83913	II (7-18)	40 ± 30	295–103
<i>Abies</i> sp.	Poz-83912	II (7-18)	110 ± 30	282–82
PUERTO DE LOS VALIENTES				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Pinus</i> sp.	Poz-113775	IV (XXX)	3860 ± 35	4294–4225
Deciduous <i>Quercus</i>	Poz-113776	IV (85-108)	1065 ± 30	1092–991
<i>Abies</i> sp.	5160.1.1	IV (85-108)	1197 ± 73	1030
Deciduous <i>Quercus</i>	Poz-113268	II (18-56)	630 ± 30	622
<i>Abies</i> sp.	Poz-113772	IV (85-108)	360 ± 30	491–385
<i>Acer</i> sp.	Poz-113774	IV (85-108)	285 ± 30	420–226
<i>Abies</i> sp.	Poz-113771	I (0-18)	345 ± 30	383
<i>Abies</i> sp.	Poz-113773	I (0-18)	335 ± 30	380
FUENFRÍA ALTA				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C ¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Abies</i> sp.	Poz-113780	III (45-78)	8740 ± 50	9619
<i>Abies</i> sp.	Poz-113779	I (0-14)	4970 ± 35	5897–5668
<i>Abies</i> sp.	Poz-113778	I (0-14)	5015 ± 35	5726–5679
<i>Pinus</i> sp.	Poz-113781	III (45-78)	3590 ± 35	4123–3800
<i>Pinus</i> sp.	Poz-113269	IV (78-94)	3650 ± 40	3939–3921

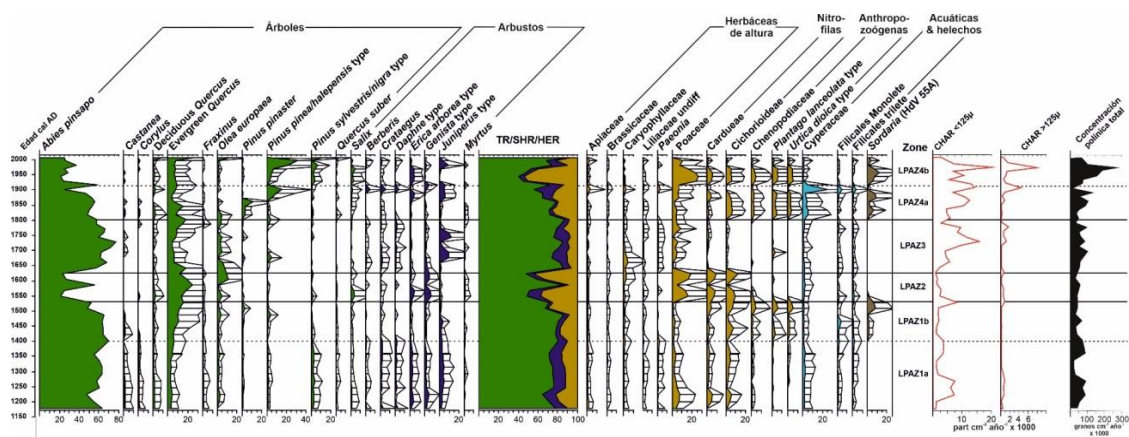
Deciduous <i>Quercus</i>	Poz-113783	III (45-78)	1510 ± 30	1564–1380
Deciduous <i>Quercus</i>	Poz-113782	I (0-14)	1095 ± 30	1023–1003
JARASTEPAR 2				
Taxa	Lab. Code	Level / Sampling depth	AMS C¹⁴ age (BP)	Age cal. BP
<i>Abies</i> sp.	5162.1.1	I (0-21)	9038 ± 121	9830
<i>Abies</i> sp.	5163.1.1	I (0-21)	8861 ± 122	9669–9629
<i>Abies</i> sp.	5161.1.1	I (0-21)	8637 ± 40	9606

Source: drawn up by the authors on the basis of data collected by Olmedo-Cobo et al. (2019, 2021) and Pardo-Martínez et al. (2021).

13.3.2. Pollen analysis

The results show the conclusions arising from the only paleo-palynological survey carried out to date in the Serranía de Ronda (see Alba-Sánchez et al., 2019) (Figure 38). The survey was performed in a wetland in an area known as the Cañada de Enmedio, in the Sierra de las Nieves National Park. On the basis of these palynological records, it was possible to identify changes in land use, and the evolution of the Spanish fir forests over the last eight centuries (1180 AD to the present). In this last section, the decline of *Abies pinsapo* can be observed in recent centuries. During the Islamic period, there was little human impact on the *A. pinsapo* forest whose structure remained relatively stable. However, a process of degradation began as a result of the intensification of human activities during the Christian period. Both the size and the biodiversity of these forests were affected by deforestation to provide wood for shipbuilding, mining, the wider commercial use of charcoal, extensive agriculture, livestock-farming and grazing. The latest sequence of the sedimentary record reveals that around the beginning of the 20th century, the mountains around Ronda were subject to severe deforestation, although the conservation measures implemented in the last few decades have allowed a slight recovery and densification of the fragmented populations of *A. pinsapo*. Finally, and as a consequence of progressively hotter, drier conditions due to global warming, in recent years there has been an important extension in the populations of *Quercus rotundifolia*.

Figure 38. Pollen diagram of the sequence from Las Ánimas.



Source: Alba-Sánchez et al. (2019).

13.3.3. Historical information

The historical documentary sources offer a general perspective on the vegetation in the Serranía de Ronda since the 17th century onwards. A detailed study of these sources revealed that the landscape was dominated by conifer and broadleaf forests. As regards the most unusual formations in ecological and landscape terms, which include the *A. pinsapo*, Spanish fir forests, the earliest references appear in the 17th century in various municipal ordinances and in inventories of wood used to supply the Spanish Navy or for building houses (see Gil, 2002; Gómez-Zotano, 2004, 2006; Becerra, 2006; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021). The information about the Spanish fir in the General and Specific Questions from the Ensenada Land Survey, from the mid-18th century (Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021) is also of great interest, as are the written accounts of travellers and naturalists gathered by Guzmán et al. (2013) and López-Quintanilla (2013).

As regards *P. pinaster*, it has been confirmed that it grew naturally in certain enclaves in the Serranía de Ronda, such as the Sierra Bermeja (Gómez-Zotano, 2004; Olmedo-Cobo et al., 2019ab). In 1752 the Marqués de la Ensenada Land Survey referred to the peridotite outcrops as “barren land by nature which produces nothing”, with the exception of the places that hosted a population of “pinos bravíos” (the adjective “bravíos” refers to wild pines, i.e., to a native population), a fact also mentioned by the cartographer Tomás López in 1780 (Gómez-Zotano, 2004).

A great deal of information is available on broadleaf species, and in particular the *Quercus* genus, of which the most commonly worked species was the holm oak. Various sources, such as the documents about the demarcation of the land boundaries in Marbella and Ronda (1788) and those from the ironworks in Marbella, mention the existence of cork oak and holm oak trees in certain areas of the Sierra del Real (Gómez-Zotano, 2004). As regards the Portuguese Oak, the first references appear in the 16th century in the General Archives of Simancas and in municipal ordinances from the town of Benaoján (Becerra, 2021; Urbaneja, 2021). Later, various different documents and field journals by 19th and 20th century naturalists continue to indicate the presence of Portuguese Oaks in various parts of the Serranía de Ronda, from the Valley of the River Guadiaro to the Sierra de las Nieves passing through Ubrique, Grazalema or Cortes de la Frontera, as highlighted by Castillo-Rodríguez (2021), De Benito (2021), Urbaneja (2021) and Vargas-Jiménez (2021). In spite of that, all the historic references refer to the common Portuguese oak (*Q. faginea*), and there are no reliable historical mentions of the genuine mountain Portuguese oaks (*Q. faginea* subsp. *alpestris*), apart from those relating to the first material collected for this species by the Swiss botanist, Pierre Edmond Boissier, in 1837.

13.3.4. Species distribution models

The main species distribution models indicate an overall decline in the forest mass in the southern part of the Iberian Peninsula. Special interest has been shown in the models applying to the *A. pinsapo* (Navarro-Cerrillo et al., 2006, 2013; Sánchez-Salguero, 2007; Alba-Sánchez et al., 2010; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; Gutiérrez-Hernández, 2018; González-Hernández et al., 2021), based on patterns of suitability and multivariable regressions to establish different degrees of potentiality regarding the previous presence of this species in the mountains in the south and south-east of Spain (Serranía de Ronda, Sierras de Almirante, Sierra Nevada, Sierras de Cazorla-Segura and Sierra de Aitana).

As regards the Serranía de Ronda, Sánchez-Salguero (2007) established optimum potentiality for the Spanish fir in the highest levels of the main mountain systems in the province of Cadiz (Sierra del Pinar, Sierra del Endrinal, Sierra del Caíllo, Sierra de Líbar and Sierra de los Pinos).

Other models, such as those developed by Navarro-Cerrillo et al. (2006, 2013), show enlarged maps for the group of mountain systems which currently host *A. pinsapo*: Sierra de las Nieves, Sierra Bermeja and Sierra de Grazalema. The results show high potentialities based on two fundamental requirements: high average altitude and north-facing.

For their part, the models developed by González-Hernández et al. (2021) highlight the mismatch between the current niche and the reproductive niche of *A. pinsapo* in response to a changing climate. These authors observed a change in the altitude range, where the young trees are migrating upwards (or northwards) towards cooler and wetter climates leaving behind the older generations of trees to try to survive at lower altitudes. Mature trees may show some degree of resilience to less-than-ideal conditions, surviving in areas where seedlings can no longer establish themselves, so making it difficult for the species to complete its life-cycle.

At a broader geographical scale, perhaps the most interesting studies are those by Alba-Sánchez et al. (2010) and Alba-Sánchez & López (2013), who created a suitability model for *A. pinsapo* for the Baetic Cordillera as a whole. The analysis of this model shows that the highest suitability levels were restricted to the Rondeño sector of the Baetic Province, the enclave currently hosting the only populations of Spanish fir in the Iberian Peninsula. At the same time the model broadens the habitability area for this species to other mountain systems in the south and east of the Iberian Peninsula, such as Sierra Gorda, Sierra Tejada, Sierra Nevada, Sierra de Cazorla, Sierra de Alcaraz, Sierra de Aitana, Sierra de Alfaro and Sierra de Mondúver, although the suitability rates are significantly lower in the more easterly mountain systems.

Lastly, and in order to analyse the progression of the different ecological niches for *A. pinsapo* in the current context of climate change, the Regional Government of Andalusia has developed various different prospective models as part of a project called “Escenarios locales de cambio climático. Clasificación del Índice de distribución potencial del Pinsapo (*Abies pinsapo*) (Junta de Andalucía, 2014)”. These models show the progression of the potential enclaves of *A.*

pinsapo in three large periods: from 2011 to 2014, from 2014 to 2017 and from 2071 to 2099, taking the period 1961-2000 as the period of reference. The results show a progressive decline in the area of potential habitability of the Spanish fir at the end of this century. These findings are in line with the conclusions reached by Gutiérrez-Hernández (2018), who by assembling models for the ecological niche of *A. pinsapo* with a horizon at the year 2100, estimated drastic potential and actual reduction in the species during the coming decades. This regressive dynamic is also applicable to other tree species from the Serranía de Ronda of great interest in ecological and landscape terms, such as *Quercus rotundifolia*, *Quercus suber*, *P. pinaster* and *Castanea sativa*, taxa whose potential habitability areas also seem likely to decline in the coming years.

13.3.5. New paleoecological data about the composition and dynamics of the forests in the Serranía de Ronda

During the present research, pedoanthracological analysis was systematically applied to 6 new sites in the southwestern end of the Baetic Cordillera. In this way, we discovered ancient populations of conifers such as *Abies* sp. and *P. nigra/sylvestris*-type that are currently absent in several of the sites sampled. The latter is particularly interesting because it is not currently present in any of the mountainous reliefs that make up the Serranía de Ronda. These findings were contextualized with information from other available sources, and data from previous research by Olmedo-Cobo et al. (2019, 2021) and Pardo-Martínez et al. (2021). This allowed for a much broader understanding of the paleoecological dynamics of the vegetation in the Serranía de Ronda. The data obtained suggest that trees played a much greater role in certain enclaves in the Serranía de Ronda. This phenomenon has also been observed in large parts of the European continent where, after the ice receded to (almost) its present-day distribution, most of the forests in Europe reached their maximum size (Giesecke et al., 2017; Zanon et al., 2018).

In the case of *Abies* sp., the dates obtained by carbon dating for a total of 51 charcoal fragments –7 in this study– confirmed a larger distribution area in mountain areas over the course of the last millennia than there is today, in line with the conclusions reached by Linares (2011). The earliest records suggest that the Spanish fir was present in locations such as Palmitera 1 (Sierra Palmitera), Fuenfría Alta (Sierra de las Nieves) and Jarastepar 2 (Sierra del Oreganal), with remains dating from between 9931–9616 and 9619 years cal. BP, as reported by Olmedo-Cobo et al. (2021) and Pardo-Martínez et al. (2021). These data reveal the role that may have been played by these enclaves during the migration of the Spanish fir over the course of the last millennia. In this way, localities such as Palmitera 1, Fuenfría Alta and Arroyo de los Lobos 2 —the last one much more recently— may have provided a physical connection between the populations in the Sierra de las Nieves and the Sierra Bermeja. For its part, Jarastepar 2 could have acted as a link between the Spanish fir forests in the Sierra de las Nieves National Park and the Sierra de Grazalema Natural Park. This past distribution range seems to follow a similar pattern to that shown on the maps produced by Euforgen (2022),

which show a uniform extension of *Abies* sp. through all the main mountain systems in the Serranía de Ronda. These maps do not in fact depict the real situation today but could show the past distribution of this species. In the same way, all the paleo-populations of *Abies* discovered coincide with the potential domains established by the different available models (Navarro-Cerrillo et al., 2006, 2013; Sánchez-Salguero, 2007; Alba-Sánchez et al., 2010; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; Gutiérrez-Hernández, 2018; González-Hernández et al., 2021).

At the same time, when the new carbon dating results obtained for *P. pinaster* in various locations in the Serranía de Ronda are combined with the existing ones, they seem to indicate on the one hand, the dynamism of the pine forest, which apparently replaced the Spanish fir (for example in Fuenfría Alta) about 6000 years ago, as noted by Olmedo-Cobo et al. (2021). This dynamic was accentuated about 4500–4000 years ago, due to hotter and drier conditions in the western Mediterranean (Jiménez-Moreno et al., 2013; Mauri et al., 2015). The results also reveal that the Spanish fir forests coexisted with *P. pinaster* at altitudes of over 1200 m a.s.l. in Sierra Palmitera in certain phases of the early and mid-Holocene, with ages of between 9931–9616 and 5441–5145 years cal. BP. In addition, the chronologies for *P. pinaster* have allowed us to confirm its status as an autochthonous plant on the ultramafic substrata of Sierra Bermeja (Olmedo-Cobo et al., 2019ab).

The identification of the *Pinus* genus in localities such as the Cañada del Cuerno (Sierra de las Nieves) during the mid-Holocene (4119–3956 years cal. BP), indicates that the long-lived, monospecific, Spanish fir forests existing today may have been enriched intermittently with *Pinus* sp. Once again, the climatic bonanza that characterized this period known as the Holocene Climatic Optimum (Davis et al., 2003; Kalis et al., 2003) could perhaps explain the expansion of the pine forest into the Spanish fir forest. Later, when conditions became favorable for the Spanish fir, the pine forest must have begun to decline until it finally disappeared from this sector of the Sierra de las Nieves. In addition, the lack of *Abies* charcoal in the pedoanthracological record, together with the presence of numerous ancient trees seems to strengthen the role played by the Spanish fir in this area during the last centuries (Olmedo-Cobo et al., 2021).

Pinus sp. has also appeared in the localities of Cascajares 1 and Puerto de los Valientes, with chronologies ranging between 10 311 and 8234–8110 years cal. BP in the first case and between 4294–4225 years cal. BP in the second. These findings seem to confirm the past presence of pine forests in both these enclaves where they no longer exist today. This information, together with the identification of ancient charcoals from practically the same era of deciduous *Quercus* (presumably attributable to *Q. faginea* subs. *alpestris*) and *Abies* in Puerto de los Valientes, appears to confirm the existence of strips of mixed forest at high altitudes in the Sierra de las Nieves (Olmedo-Cobo et al., 2021). This circumstance would also allow us to hypothesize about the greater area covered by trees in mountainous areas in the past, as highlighted in historical accounts (Castillo-Rodríguez, 2002; Gómez-Zotano, 2004). The relative

scarcity of trees today would confirm the tendency toward deforestation over the last centuries, as mentioned earlier.

Pinus sp. has also been found at the western end of the Serranía de Ronda, specifically in the Sierra del Pinar in Grazalema. The ages obtained via carbon dating reveal that this taxon was present in this Sierra in the period 310–126 years cal. BP. These dates are practically contemporary with those offered by three charcoal fragments from the *Abies* genus (between 280–80 and 276–77 years cal. BP) and seem to confirm the existence of mixed forest (fir-pine) in this enclave, less than 3 centuries ago. Together with this, the high anthracomass value of the fragments found in this locality (8285 mg/kg) offers an insight into the important impact that fire seems to have had in recent periods in this area. This coincides with the gradual withdrawal of the fir forests in this sector since the beginning of the Modern Age, as can be inferred from different historical references compiled by Guzmán et al. (2013). The burning of forests and the conversion to agricultural and grazing land, coinciding with better topographic conditions, seem to have intensified during the wars arising from the Christian reconquest of Al-Ándalus (15th and 16th centuries), and in the fight for survival produced by the lack of cultivated land (16th and 19th centuries). The severe fire damage caused to these forests may also have led to a significant decline in the area occupied by the Spanish fir and presumably also by pine forests.

Charcoal belonging to the *Pinus* genus has also been identified at altitudes of less than 800 m a.s.l. in the Sierra del Tablón, a mountainous spur that forms the northern boundary of the Serranía de Ronda. The sole charcoal fragment was dated at 14 013–13 440 years cal. BP, the oldest in the present study. It proved impossible to exactly identify the species and we were therefore obliged to hypothesize about which pine trees featured most in the tree canopy in this enclave during the Pleistocene-Holocene transition, a stage of great paleo-environmental importance (López-Sáez et al., 2008; García-Alix et al., 2021). Badal et al. (2013) confirmed the existence of orophile (mountain-loving) pine forests towards the end of the Solutrean ($\pm 16\ 000$ years cal. BP) in the south of the Iberian Peninsula at altitudes of up to 1000 m a.s.l. During this period the Sierra del Tablón would have been subject to the influence of the upper supra-mediterranean and the lower oro-mediterranean bioclimatic levels, while the coastal strip would have been dominated by mesomediterranean conditions (Aura-Tortosa et al., 2002). On top of that, various palynological and anthracological records performed in locations near the Sierra del Tablón have detected the presence of *P. nigra/sylvestris*-type on the southwestern flank of the Baetic Cordillera between 1000 and 10 000 years ago (López-Sáez et al., 2008; Carrión, 2012). This hypothesis was reinforced by the discovery of *P. nigra/sylvestris*-type charcoal in localities such as Cascajares 4 and Arroyo de los Lobos 1 (Sierra Blanca de Igualeja), and of various fragments of *Pinus* sp. dating back more than 10 000 years in Jarastepar 2 (Sierra del Oreganal), all of which were situated above 1100 m a.s.l. (Pardo-Martínez et al., 2021). All of these findings confirm the possible role that the Sierra del Tablón may have played as a refuge after the Last Glacial Maximum, a period when certain sub-alpine pine forests must have shown great resilience in different sectors of the Baetic Cordillera (Rubiales et al., 2010). During the Holocene, the chronologies obtained for 3 fragments of *Quercus* sp. confirm the presence of

this taxon over the last 10 000 years. Similarly, the progressive trend towards hotter, drier environmental conditions in the south of Spain (Jalut et al., 2000; Cacho et al., 2001) is likely to favour the disappearance of the pine forest, giving way to more thermophile taxa such as evergreen *Quercus* sp. (Carrión, 2012). This dynamic continues today and coincides with the classification established by Rivas-Martínez (2011), who stated that the potential vegetation in the Sierra del Tablón corresponds to sclerophyll, thermo-mesomediterranean holm oak and Portuguese oak forests, today enriched with thermophile species such as *Pistacia lentiscus* and *Arbutus unedo*, as evidenced by the pedoantracological record.

Fragments from the *Fraxinus* and *Salix* genera appear in the charcoal record from the Cañada de Enmedio sampling site (Sierra de las Nieves), although these taxa do not grow in this locality today. However, they would seem to have played a relatively secondary role, accounting respectively for just 8.7 % and 0.7 % of the fragments detected, as noted by Olmedo-Cobo et al. (2021). This fact, together with the signal obtained for other taxa which currently have a fairly minor presence within the plant system in this enclave, would suggest greater heterogeneity in the arboreal stratum in the past. The presence of these minor taxa, together with the dates obtained for *Fraxinus*, and those obtained for *Acer* (998–865 and 612–568 years cal. BP) and deciduous *Quercus* (979–802 y 852–760 years cal. BP), suggest that the long-living, practically monospecific Spanish fir forest that we see today was probably accompanied by different deciduous genera over the course of the last millennium. Later, and as inferred by the last palynological survey carried out in the study area, it seems that a situation that was unfavourable for the conservation of forests developed until well into the 17th century (Alba-Sánchez et al., 2019). Later, the modern era brought with it the progressive decline in the forest mass, with repeated forest fires and intensive deforestation processes, which led to a notable reduction in the surviving tree formations, including the Spanish fir forest (Guzmán et al., 2013). This modern phase of degradation of the forests is highlighted by the most recent carbon dating records obtained for carbon fragments of *Abies* sp. in this enclave with ages ranging between 343–80 and 324–101 years cal. BP. This confirms the role played by fire during the last centuries in the configuration of the plant landscape in this sector.

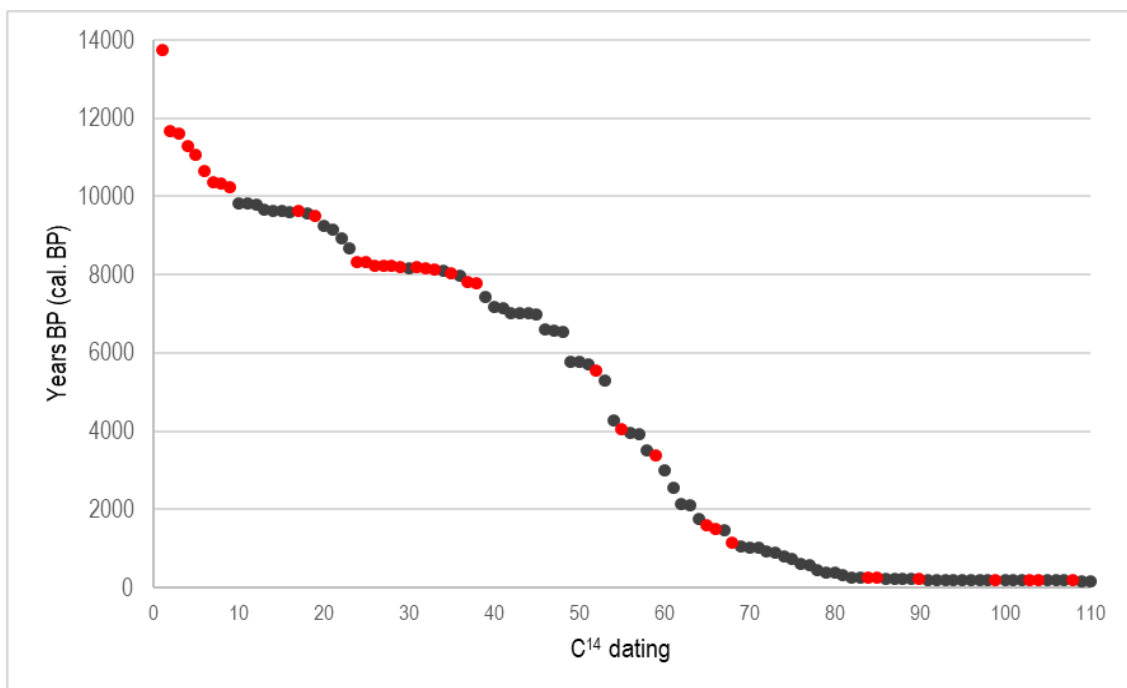
13.3.6. Importance of fire in the dynamics of the floresta during the Holocene

Forest fires have been a key factor in the configuration of the plant landscape in the western Mediterranean (Bond & Keeley, 2005; Turner et al., 2008; Vannière et al., 2008). There is ample evidence of the important role played by fire in the genesis of present-day plant ecosystems in the north and centre of the Iberian Peninsula (López-Sáez et al., 2014; Perez-Obiol et al., 2016). In the south, however, despite of being a territory that is extremely vulnerable to forest fires, paleo-geographic research into this question has been relatively limited (Harrison et al., 2021; Global Paleofire Database, 2022; Sweeney et al., 2022).

The new datings we obtained –36 in total–, together with those obtained during earlier research by Olmedo-Cobo et al. (2019, 2021) and Pardo-Martínez et al. (2021), provide an excellent

framework of reference to expand our knowledge of forest fires at the western end of the Baetic Cordillera during the Holocene (Figure 39). They also provide a considerable volume of information for the Global Paleofire Database, offering very precise data about the different episodes of fire in the Serranía de Ronda throughout the Holocene. The 110 radiocarbon dates available for the whole of the Serranía de Ronda show that there were two hiatuses between 6500–5800 and 5200–4300 years cal. BP, periods during which no carbon fragments were detected. This suggests that there were fewer fires in these periods, a possibility corroborated by the evidence of cooling between the two Holocene Climatic Optimums (Davis et al., 2003; Ilvonen et al., 2022), and to the very limited human presence in medium and high altitudes of the Serranía de Ronda during the initial period of the Neolithic era in Andalusia (Mid Holocene), at which time there were settlements in nearby areas on the Andalusian coast and in the depression of Ronda (Ramos-Muñoz et al., 2017; Castaño-Aguilar, 2021). On this question, the very limited available information seems to some extent to match the results obtained in this study by highlighting that the period running between 7500–5200 years cal. BP was one of optimum conditions for mesophyte species and the period with the lowest level of fires (Carrión, 2002; Carrión et al., 2003).

Figure 39. Evidences of fire detected in the Serranía de Ronda as a whole. The signs detected during this research are shown in red. The mean values for the different chronological ranges are also indicated.



Source: own elaboration on the basis of data from Olmedo-Cobo et al. (2019, 2021) and Pardo-Martínez (2021).

Taken together, the data show higher levels of fire in the study area over the last 2000 years in line with the different historical accounts. 49 charcoal fragments were carbon-dated from this period. This trend can be extended to other parts of the south and south-west of Andalusia, as evidenced by the palynological records (Carrión, 2012). This was exacerbated by the increasing intensification of agricultural production and seems to have been the primary cause of the

deterioration of the natural environment of the Serranía de Ronda (Ramos-Muñoz et al., 2017; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021).

In much more recent periods, the increased frequency and virulence of forest fires has been verified in different localities in the study area such as Sierra de Tolox and Sierra Bermeja, in which a total of 2500 and 16 542 ha respectively have been burnt during the last 50 years (Martos-Martín & Gómez-Zotano, 2021; Millán-Madrid & Martínez-Murillo, 2021).

13.4. Conclusions

The present study has provided new data to improve our paleobiogeographic knowledge of certain relict forests at the southwestern end of the Baetic Cordillera, an area where there is a serious lack of such information. The results of this research have been added to the existing database, so creating an important source of hard data on the dynamics of the forests of the Serranía de Ronda during the Holocene. Likewise, the 110 radiocarbon dates –36 of them obtained in this study– are an essential source for the paleogeographical study of forest fires in the south of the Iberian Peninsula.

The wide network of pedological sampling carried out over the last few years has enabled us to find ancient populations of taxa that are currently absent in some of the localities sampled. The data highlight the role played by certain physiographical enclaves as refuges for flora over the course of the Holocene. Mountain ranges such as the Sierra del Oreganal and the Sierra Palmitera seem likely to have acted as important ecological corridors that facilitated links between the three separate unconnected masses of *A. pinsapo* that exist today.

Various fragments of *Pinus nigra/sylvestris*-type were found amongst the soil samples. This is the first pedoanthracological evidence of this taxonomic group in this sector of the Baetic Cordillera. Mountain areas such as the Sierra del Tablón and the Sierra Blanca de Igualeja seem likely to have acted as important post-glacial refuges for certain mountain-loving pine forests during the Pleistocene-Holocene transition. These locations must once have formed the south-western boundaries of the high mountain pine forests in the first stages of the Holocene, before they were progressively restricted towards their current distribution area.

At the same time, the complementary nature of the different sources of information that have come together in the multi-proxy approach applied in this research have revealed the greater importance and diversity of the tree cover in the study area during the last millennia. This gives us a much more accurate picture of the past vegetation and allows us to contextualize it with the different environmental and anthropic conditions that have prevailed in the Serranía de Ronda at different times during the Holocene.

This paleoecological information could be of great value for understanding the environmental dynamics that have contributed to shaping our current plant landscape. As a result, it could be an effective tool for the adaptive management of the most endangered forests in the face of global change. To this end, it is important to continue broadening our paleoecological

knowledge of the mountains in the south of the Iberian Peninsula as a future line of research. This will involve extending the current network of pedoanthracological and palynological surveys to the rest of the Baetic Cordillera.

References

- Aedo, C., Buirra, A., Medina, L. & Fernández-Albert, M. (2017). The Iberian Vascular Flora: Richness, Endemicity and Distribution Patterns. En Loidi, J. (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (pp. 101–130). Springer.
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Benito, B., Linares, J.C., Nieto-Lugilde, D. & López-Merino, L. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: a phytogeographic approach using fossil pollen data and species distribution models. *Diversity and Distributions*, 16(2), 214–228. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00636.x>
- Alba-Sánchez, F. & López-Sáez, J.A. (2013). Paleobiogeografía del pinsapo en la Península Ibérica durante el Cuaternario. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 33–52). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Alba-Sánchez, F., Abel-Schaad, D., López-Sáez, J.A., Sabariego Ruiz, S., Pérez-Díaz, S. & González-Hernández, A. (2018). Paleobiogeografía de *Abies* spp. y *Cedrus atlantica* en el Mediterráneo occidental (península ibérica y Marruecos). *Ecosistemas*, 27(1), 26–37. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1441>
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Abel-Schaad, D., Sabariego, S., Pérez-Díaz, S. et al. (2019). The impact of climate and land-use changes on the most southerly fir forests (*Abies pinsapo*) in Europe. *The Holocene*, 29(7), 1176–1188. <https://doi.org/10.1177/0959683619838>
- Aura-Tortosa, J.E., Jordá-Pardo, J.F., Pérez-Ripoll, M., Rodrigo-García, M.J., Badal, E. et al. (2002). The far south: the Pleistocene-Holocene transition in Nerja Cave (Andalucía, Spain). *Quaternary International*, 93-94, 19–30. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00004-6)
- Badal, E., Carrión, Y., Figueiral, I. & Rodríguez-Ariza, M.O. (2013). Pinares y enebrales. El paisaje solutrense en Iberia. *Espacio Tiempo y Forma. Serie I, Prehistoria y Arqueología*, 1, 259–272.
- Beato-Bergua, S., Poblete-Piedrabuena, M.A., & Cunill-Artigas, R. (2019). *Taxus baccata* en la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 1–30. <https://doi.org/10.21138/bage.2772>
- Becerra, M. (2006). *Ordenación y aprovechamiento de los pinsapares rondeños durante el siglo XIX. La memoria de Antonio Laýnez*. Editorial La Serranía.

- Becerra, M. (2021). Evolución histórica de los bosques del sector nororiental del Macizo de Líbar. El caso de los propios de la villa de Benaolán (1569-1866). En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 479–494). Editorial La Serranía.
- Blondel, J. (2006). The 'design' of Mediterranean landscapes: a millennial story of humans and ecological systems during the historic period. *Human Ecology*, *34*, 713–729. <https://doi.org/10.1007/s10745-006-9030-4>
- Bond, W.J. & Keeley, J.E. (2005). Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, *20*, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>
- Cacho, I., Grimalt, J., Canals, M., Sbaiffi, L., Shackleton, N.J. et al. (2001). Variability of the western Mediterranean Sea surface temperature during the last 25,000 years and its connection with the Northern Hemisphere climatic changes. *Paleoceanography*, *16*, 40–52. <https://doi.org/10.1029/2000PA000502>
- Carracedo-Martín, V., Cunill-Artigas, R., García-Codrón, J.C., Pèlachs-Mañosa, A., Pérez-Obiol, R. & Soriano-López, J.M. (2017). Fuentes para la geografía histórica de los incendios forestales. Algunas consideraciones metodológicas. *Cuadernos Geográficos*, *56*(3), 66–89.
- Carrión, J.S. (2002). Patterns and processes of Late Quaternary environmental change in a montane region of southwestern Europe. *Quaternary Science Reviews*, *21*(18-19), 2047–2066. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00010-0](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00010-0)
- Carrión, J.S., Yll, E.I., Walker, M.J., Legaz, A., Chaín, C. et al. (2003). Glacial refugia of temperate, Mediterranean and Ibero-North African flora in south-eastern Spain: new evidence from cave pollen at two Neanderthal man sites. *Global Ecology and Biogeography*, *12*(2), 119–129. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00013.x>
- Carrión, J.S. (2012). *Paleoflora y Paleovegetación de la Península Ibérica e Islas Baleares: Plioceno-Cuaternario*. Ministerio de Economía y Competitividad, Universidad de Murcia y Fundación Séneca.
- Castañeda-Fernández, V. (2008). El primer poblamiento humano de la Serranía de Ronda y su relación con el campo de Gibraltar. Una aproximación histórica. *Mainake*, *30*, 331–344.
- Castaño-Aguilar, J.M. (2021). Poblamiento antiguo en los bosques de la Serranía de Ronda. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 59–75). Editorial La Serranía.
- Castillo-Rodríguez, J.A. (2000). *Paisajes, modelos de actividades y formas de vida rural en el Valle del Genal (Málaga)* (Tesis Doctoral). Universidad de Sevilla.

- Castillo-Rodríguez, J.A. (2002). *El Valle Del Genal. Paisajes y Formas de Vida Campesinas*. Centro de Ediciones de la Diputación Provincial de Málaga.
- Castillo-Rodríguez, J.A. (2021). La transformación de los bosques y arboledas del Valle del Genal: un modelo de la cultura de vertientes en la montaña surmediterránea. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 543–574). Editorial La Serranía.
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.P. et al. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8, 972–980. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- Cunill, R. (2010). *Estudi interdisciplinari de l'evolució del límit superior del bosc durant el període holocènic a la zona de Plaús de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català* (Tesis Doctoral). Universidad Autònoma de Barcelona.
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C, Pèlachs, A. & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(4–5), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00334-011-0342-y>
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A., Rodríguez, J.M. et al. (2013). Holocene high-altitude vegetation dynamics in the Pyrenees: a pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach. *Quaternary International*, 289, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.04.041>
- Davis, B.A.S., Brewer, S., Stevenson, A.C. & Guiot, J. (2003). The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews*, 22(15–17), 1701–1716. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(03\)00173-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00173-2)
- Davies, A.L. & Bunting, M.J. (2010). Applications of Palaeoecology in Conservation. *The Open Ecology Journal*, 3(2), 54–67. <https://doi.org/10.2174/1874213001003020054>
- De Benito, N. (2021). Los montes de Cortes de la Frontera: caracterización y consideraciones históricas. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 495–514). Editorial La Serranía.
- Euforgen (2022). *Abies pinsapo*. Recuperado de <https://www.euforgen.org/species/abies-pinsapo/>
- Fægri, K. & Iversen, J. (1989). *Textbook of pollen analysis*. John Wiley & Sons.
- García-Alix, A., Camuera, J., Ramos-Román, M.J., Toney, J.L., Sachse, D. et al. (2021). Paleohydrological dynamics in the Western Mediterranean during the last glacial cycle. *Global and Planetary Change*, 202, 103527. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103527>
- García-Álvarez, S., Bal, M.C., Allée, P., García-Amorena, I. & Rubiales, J.M. (2017). Holocene treeline history of a high-mountain landscape inferred from soil charcoal: The case of Sierra

- de Gredos (Iberian Central System, SW Europe). *Quaternary International*, 457(1), 85–98.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.04.019>
- Giesecke, T., Brewer, S., Finsinger, W., Leydet, M. & Bradshaw, R.H.W. (2017). Patterns and dynamics of European vegetation change over the last 15,000 years. *Journal of Biogeography*, 44(7), 1441–1456. <https://doi.org/10.1111/jbi.12974>
- Gil, A. (2002). *Simón de Rojas Clemente. Viaje a Andalucía. Historia Natural del Reino de Granada*. GBG Editora.
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8).
<https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Global Paleofire Database (2022). Spatial distribution of sites. Recuperado de https://www.paleofire.org/index.php?p=DRE/spatial_distribution&gcd_menu=DRE
- Goeury, C. & De Beaulieu, J.L. (1979). A propos de la concentration du pollen a laide de la liqueur de Thoulet dans les sediments minéraux. *Pollen Spores*, 21(1-2), 239–251.
- Gómez-Zotano (2004). *El papel de los espacios montañosos como traspais del litoral mediterráneo andaluz, el caso de Sierra Bermeja (provincia de Málaga)* (Tesis Doctoral). Universidad de Granada.
- Gómez-Zotano, J. (2006). *Naturaleza y paisaje en la Costa del Sol Occidental*. Servicio de Publicaciones Centro de Ediciones de la Diputación de Málaga.
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Martínez-Ibarra, E. (2017). Descubrimiento y caracterización geográfica de una depresión ultramáfica en Sierra Bermeja: nuevos datos geomorfoedáficos, fitogeográficos y paleoecológicos. *Pirineos*, 172. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172001>
- Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal*. Editorial La Serranía.
- González-Hernández, A., Nieto-Lugilde, D., Peñas, J. & Alba-Sánchez, F. (2021). Lean Pattern in an Altitude Range Shift of a Tree Species: *Abies pinsapo* Boiss. *Forests*, 12(11), 1451. <https://doi.org/10.3390/f12111451>
- Gutiérrez-Hernández, O. (2018). Impacto del calentamiento global en la distribución y supervivencia del pinsapo (Serranía de Ronda). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 76, 504–549. <https://doi.org/10.21138/bage.2532>
- Guzmán, J.R., Catalina, M.A., Navarro-Cerrillo, R.F., López-Quintanilla, J. & Sánchez, R. (2013). Los paisajes del pinsapo a través del tiempo. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 111–158). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

- Harrison, S.P., Villegas-Díaz, R., Cruz-Silva, E., Gallagher, D., Kesner, D. et al. (2021). The Reading Palaeofire database: an expanded global resource to document changes in fire regimes from sedimentary charcoal records. *Earth System Science Data*, 14(3), 1109–1124. <https://doi.org/10.5194/essd-14-1109-2022>
- Iivonen, L., López-Sáez, J.A., Holmström, L., Alba-Sánchez, F., Pérez-Díaz, S. et al. (2022). Spatial and temporal patterns of Holocene precipitation change in the Iberian Peninsula. *Boreas*, 51(4), 776–792. <https://doi.org/10.1111/bor.12586>
- Jalut, G., Esteban, A., Bonnet, L., Gauquelin, T. & Fontugne, M. (2000). Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(3-4), 255–290. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00075-4)
- Jiménez-Moreno, G., García-Alix, A., Hernández-Corbalán, M.D., Scott, R. & Delgado-Huertas, A. (2013). Vegetation, fire, climate and human disturbance history in the southwestern Mediterranean area during the late Holocene. *Quaternary Research*, 79(2), 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.11.008>
- Junta de Andalucía (2014). WMS Escenarios locales de cambio climático. Clasificación del Índice de distribución potencial del Pinsapo (*Abies pinsapo*). Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/buscador?categoryVal=>
- Kalis, A.J., Merkt, J. & Wunderlich, J. (2003). Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe - Human impact and natural causes. *Quaternary Science Reviews*, 22(1), 33–79. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00181-6](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00181-6)
- Linares, J.C. (2011). Biogeography and evolution of *Abies* (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: the roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 38(4), 619–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02458.x>
- López-Quintanilla, J. (2013). *Los pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Universidad de Córdoba.
- López-Sáez, J.A., López-Merino, L. & Pérez-Díaz, S. (2008). Historia de la vegetación: una aproximación arqueopalinológica. *Antiquitas*, 20, 41–47.
- López-Sáez, J.A., Abel-Schaad, D., Pérez-Díaz, S., Blanco-González, A., Alba-Sánchez, F. et al. (2014). Vegetation history, climate and human impact in the Spanish Central System over the last 9,000 years. *Quaternary International*, 353, 98–122. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.06.034>
- López-Tirado, J. & Hidalgo, P. (2014). A high resolution predictive model for relict trees in the Mediterranean-mountain forests (*Pinus sylvestris* L., *P. nigra* Arnold and *Abies pinsapo* Boiss.) from the south of Spain: A reliable management tool for reforestation. *Forest Ecology and Management*, 330, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.009>

- Martos-Martín, J. & Gómez-Zotano, J. (2021). Sierra Bermeja y los grandes incendios forestales. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 391–437). Editorial La Serranía.
- Mauri, A., Davis, B.A.S., Collins, P.M., Kaplan, J.O. (2015). The climate of Europe during the Holocene: a gridded pollen-based reconstruction and its multi-proxy evaluation. *Quaternary Science Reviews*, 112, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.013>
- Médail, F. & Quézel, P. (1997). Hot-Spots analysis for conservation of plant biodiversity in the Mediterranean Basin. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 84(1), 112–127. <https://doi.org/10.2307/2399957>
- Médail, F. & Myers, N. (2004). Mediterranean Basin. En Mittermeier, R., Robles, P., Hoffmann, M., Pilgrim, J., Brooks, T. et al. (Eds.), *Hotspots revisited: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions* (pp. 144–147). CEMEX.
- Médail, F. & Diadema, K. (2009). Glacial refugia influence plant diversity patterns in the Mediterranean Basin. *Journal of Biogeography*, 36(7), 1333–1345. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2008.02051.x>
- Millán-Madrid, M. & Martínez-Murillo, J.F. (2021). Evolución reciente de los incendios forestales y riesgo de incendio en las Sierras de Tolox. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 439–455). Editorial La Serranía.
- Molina-Venegas, R., Aparicio, A., Lavergne, S. & Arroyo, J. (2017). Climate and topographical correlates of plant palaeo- and neoendemism in a Mediterranean biodiversity hotspot. *Annals of Botany*, 119(2), 229–238. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw093>
- Moore, P.D., Webb, J.A. & Collinson, M.E. (1991). *Pollen analysis*. Blackwell.
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., Da Fonseca, G.A. & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Navarro-Cerrillo, R.M., Fernández, L., Blanco-Oyonarte, P., Calzado, C., López-Quintanilla, J. et al. (2006). Physiography potentiality of Spanish fir forests (*Abies pinsapo* Boiss.) in Andalucía. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 15, 137–152. <https://doi.org/10.5424/srf/200615S1-00988>
- Navarro-Cerrillo, R.M., López-Quintanilla, J., Blanco-Oyonarte, P., Sánchez-Salguero, R., Guzmán-Álvarez, J.R. et al. (2013). Distribución actual y potencial de pinsapo (*Abies pinsapo* Boiss). En Lopez-Quintanilla, J. (Ed.), *Los pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp.159–186). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Gómez-Zotano, J. & Pardo-Martínez, R. (2019a). Aportaciones del análisis pedoantracológico al conocimiento paleoecológico de *Pinus pinaster* en el sur de España: el caso de Sierra Bermeja. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2667>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Gómez-Zotano, J. (2019b). The native status of *Pinus pinaster* on serpentine soils: charcoal analysis and palaeoenvironmental history in Sierra Bermeja (southern Iberian Peninsula, Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*, 28, 417–432. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0701-z>
- Olmedo-Cobo, J.A., Pardo-Martínez, R. & Gómez-Zotano, J. (2021). First data about the Holocene composition of mountain forests in the Sierra de las Nieves Natural Park (Ronda Mountains, Spain) through pedoanthracological analysis. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 89. <https://doi.org/10.21138/bage.3099>
- Pardo-Martínez, R. (2020). La pedoantracología en España: una revisión bibliográfica. *Pirineos*, 175, e059. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2020.175009>
- Pardo-Martínez, R., Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). The history of *Abies pinsapo* during the Holocene in southern Spain, based on pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 31, 307–321. <https://doi.org/10.1007/s00334-021-00855-w>
- Pérez-Latorre, A.V., Navas, P., Gil, D. & Cabezudo, B. (1998). Datos sobre flora y vegetación de la Serranía de Ronda (Málaga, España). *Acta Botanica Malacitana*, 23, 149–191.
- Pérez-Latorre, A.V., Hidalgo-Triana, N., Cabezudo, B. & Martos-Martín, J. (2019). *Mapa Biogeográfico de la provincia de Málaga (España)*. Universidad de Málaga y Diputación de Málaga.
- Pérez-Latorre, A.V., Hidalgo-Triana, N. & Cabezudo, B. (2021). Biogeografía y bosques de la Serranía de Ronda (Cádiz-Málaga-Sevilla). En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp.11–58). Editorial La Serranía.
- Pérez-Obiol, R., García-Codron, J.C., Pèlach, A., Pérez-Haase, A. & Soriano, J.M. (2016). Landscape dynamics and fire activity since 6740 cal yr BP in the Cantabrian region (La Molina peat bog, Puente Viesgo, Spain). *Quaternary Science Reviews*, 135, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.01.021>
- Ramos-Muñoz, J., Siles-Guerrero, F., Gutiérrez-López, J.M., Martínez-Enamorado, V. & Martín-Ruiz, J.A. (2017). *Actas del I Congreso internacional de historia de la Serranía de Ronda: las ocupaciones por sociedades prehistóricas, protohistóricas y de la antigüedad en la Serranía de Ronda y Béticas Occidentales*. Editorial La Serranía.

- Rey-Benayas, J.M., Scheiner, S.M. & Franklin, J. (2002). Plant diversity, biogeography and environment in Iberia: Patterns and possible causal factors. *Journal of Vegetation Science*, 13(2), 245–258. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2002.tb02045.x>
- Rivas-Martínez, S. (2011). Memoria del Mapa de Vegetación Potencial de España. *Itinera Geobotanica*, 18, 5–800.
- Robin, V., Talon, B. & Nelle, O. (2013). Pedoanthracological contribution to forest naturalness assessment. *Quaternary International*, 289, 5–15. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.02.023>
- Rubiales, J.M., García-Amorena, I., Hernández, L., Génova, M., Martínez, F. et al. (2010). Late Quaternary dynamics of pinewoods in the Iberian Mountains. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 162(3), 476–491. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2009.11.008>
- Saltré, F., Saint-Amant, R., Gritti, E., Brewer, S., Gaucherel, C. et al. (2013). Climate or migration: what limited European beech post-glacial colonization? *Global Ecology and Biogeography*, 22(11), 1217–1227. <https://doi.org/10.1111/geb.12085>
- Sánchez-Salguero, R. (2007). *Distribución potencial de pinsapo (Abies pinsapo Boiss.) en el Parque Natural Sierra de Grazalema: Implicaciones para la regeneración de la especie bajo cubierta de pinar* (Trabajo Profesional Fin de Carrera). Universidad de Córdoba.
- Schweingruber, F.H. (1990). *Microscopic wood anatomy: structural variability of stems and twigs in recent and subfossil woods from Central Europe*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
- Stockmarr, J. (1971). Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen Spores*, 13, 614–621.
- Sweeney, L., Harrison, S. & Vander-Linden, M. (2022). Assessing anthropogenic influence on fire history during the Holocene in the Iberian Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 287, 107562. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107562>
- Talon, B., Carcaillet, C. & Thion, M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Geographie Physique et Quaternaire*, 52(2), 195–208. <https://doi.org/10.7202/004875ar>
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M.B., Sykes, M. & Colin, I. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(23), 8245–8250. <https://doi.org/10.1073/pnas.040990210>
- Turner, R., Roberts, N. & Jones, M.D. (2008). Climatic pacing of Mediterranean fire histories from lake sedimentary microcharcoal. *Global and Planetary Change*, 63(4), 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.07.002>

- Urbaneja, C. (2021). Visión histórica de las sierras del Real y de Albornoque, término municipal de Istán. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 457–479). Editorial La Serranía.
- Vannièrè, B., Colombaroli, D., Chapron, E., Leroux, A., Tinner, W. et al. (2008). Climate versus human-driven fire regimes in Mediterranean landscapes: the Holocene record of Lago dell'Accesa (Tuscany, Italy). *Quaternary Sciences Reviews*, 27(11-12), 1181–1196. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.02.011>
- Vargas-Jiménez, M.A. (2021). Los bosques de la Serranía de Ronda: la mirada ilustrada de un botánico decimonónico, Simón de Rojas Clemente y Rubio. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 95–120). Editorial La Serranía.
- Vernet, J.L., Ogereau, P., Figueiral, I., Machado, C. & Uzquiano, P. (2001). *Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents, Sud-Ouest de l'Europe: France, Péninsule ibérique et Îles Canaries*. CNRS.
- Zanon, M., Davis, B., Marquer, L., Brewer, S. & Kaplan, J.O. (2018). European Forest Cover During the Past 12,000 Years: A Palynological Reconstruction Based on Modern Analogs and Remote Sensing. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00253>

14. APROXIMACIÓN PALEOBIOGEOGRÁFICA A LA SIERRA DEL TABLÓN (SERRANÍA DE RONDA, ESPAÑA)

Resumen

Se presenta el primer estudio paleobiogeográfico de los bosques de la Sierra del Tablón, uno de los eslabones más septentrionales de la Serranía de Ronda (España) y cota más elevada de la provincia de Sevilla con 1129 m s.n.m. Se parte de la caracterización mesológica, analizando las singularidades físicas del macizo (geología, geomorfología y clima). También se aborda el estudio de la vegetación presente y pasada, identificando las formaciones dominantes y su evolución desde mediados del siglo XX, con especial atención a las facies de bosque representativas de las etapas climáticas. Finalmente, se incluyen los resultados del análisis pedoantracológico llevado a cabo en la sierra, lo que permite profundizar en la dinámica evolutiva de su vegetación a través de la realización de dos muestreos pedológicos.

Palabras clave: carbón; pedoantracología; bosque mediterráneo; coníferas; Cordillera Bética.

Abstract

This work presents the first paleobiogeographical study of the forests of the Sierra del Tablón, one of the northernmost mountain massifs of the Serranía de Ronda (Spain) and the highest point in the province of Seville with 1129 m a.s.l. For this, it starts from the mesological approach, analysing the physical characteristics of the mountain massif (geology, geomorphology and climate). The study of present and past vegetation is also addressed, identifying the dominant plant formations and their evolution since the mid-twentieth century, with particular attention to the forest facies representative of the climax stages. Finally, the results of the pedoanthracological analysis carried out in the study area are included, which enables us to knowledge about the dynamics of their vegetation through the carrying out of two pedological samples.

Keywords: charcoal; pedoanthracology; mediterranean forest; conifers; Baetic Cordillera.

14.1. Introducción

La comprensión de cómo y por qué los organismos biológicos se distribuyen en el espacio es un principio central de la investigación biogeográfica (Miller, 2010), siendo el análisis de las relaciones especies-ambientes en el tiempo un tema central en cualquier disciplina ecológica (Guisan & Zimmermann, 2000). Es importante poseer una información precisa sobre la distribución de las especies a escala espaciotemporal para poder evaluar la biodiversidad regional, si bien en muchos casos los datos existentes son insuficientes (Choe et al., 2016). En este sentido, de acuerdo con Costa et al. (1990) y Alcalde et al. (2006), los estudios paleoecológicos resultan de gran interés por dos razones: (1) la posibilidad de reconstruir los ecosistemas forestales del pasado; (2) la capacidad para estudiar la dinámica temporal de

éstos en distintas fases paleohistóricas, precisando la naturaleza de las principales perturbaciones (climáticas y/o antrópicas) acaecidas.

Buena prueba de ello es el amplio desarrollo de metodologías y técnicas reconstructivas del paisaje alcanzado en los últimos años. De especial interés para la presente investigación resulta la pedoantracología; se trata de una metodología relativamente reciente en España dentro de las disciplinas paleoecológicas, que sería implementada en la península ibérica a partir de los trabajos realizados por Cunill (2010) en el Pirineo, tal y como se desprende de la revisión pormenorizada llevada a cabo por Pardo-Martínez (2020). En consecuencia, existen grandes diferencias territoriales en su aplicación, que se ha centrado en el Pirineo, la Cordillera Cantábrica, el Sistema Central y la Cordillera Bética. En el extremo sudoccidental de esta última destaca la Serranía de Ronda como el ámbito geográfico que concentra la mayoría de los trabajos pedoantracológicos realizados en España (Pardo-Martínez, 2020).

El marco geográfico-histórico de la Serranía de Ronda, dada su originalidad, constituye un interesante campo experimental de reconocimiento de dinámicas espaciotemporales de los bosques, así como de las tensiones derivadas de sus políticas de conservación y gestión (Gómez-Zotano et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2019, 2021; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021; Pardo-Martínez et al., 2021). De acuerdo con Gómez-Zotano & Olmedo Cobo (2021), este ámbito ha experimentado un dilatado proceso de antropización, una historia común forjada a golpe de aciertos y desaciertos en el manejo de la floresta. A las actividades y aprovechamientos tradicionales llevados a cabo en el monte, tales como las cortas locales, la extracción de leñas y carboneo, las quemas para obtención de pastos, la agricultura de subsistencia, el adhesamiento, la explotación ganadera o la selección de especies dominantes, se suma la demanda de madera para la Marina Española, para las tempranas iniciativas de industrialización o para la construcción del ferrocarril Ronda-Algeciras, así como la proliferación de grandes incendios forestales a partir de la segunda mitad del siglo XX. En contraposición, en los últimos años se asiste a una cada vez mayor protección, gestión y ordenación efectiva del valioso patrimonio forestal compartido. El ser humano, por tanto, ha desempeñado un papel fundamental en la distribución pasada y presente de zonas forestadas, deforestadas o reforestadas, posibilitando, en cualquier caso, el legado forestal que actualmente enriquece el extenso patrimonio eco-cultural de la comarca.

Sin embargo, el conocimiento de la paleobiogeografía resulta claramente deficitario en algunos sectores de la serranía rondeña. Es el caso de la Sierra del Tablón, una de las estribaciones montañosas más septentrionales del conjunto serrano, que actualmente presenta un predominio del matorral preforestal de degradación. En este contexto, y como fórmula para subsanar el referido déficit de conocimiento en el área de estudio, el objetivo de esta investigación es alcanzar una primera aproximación paleobiogeográfica a la Sierra del Tablón a partir del análisis pedoantracológico que permita establecer algunas claves iniciales para entender el paisaje vegetal durante el Pleistoceno Superior y el Holoceno.

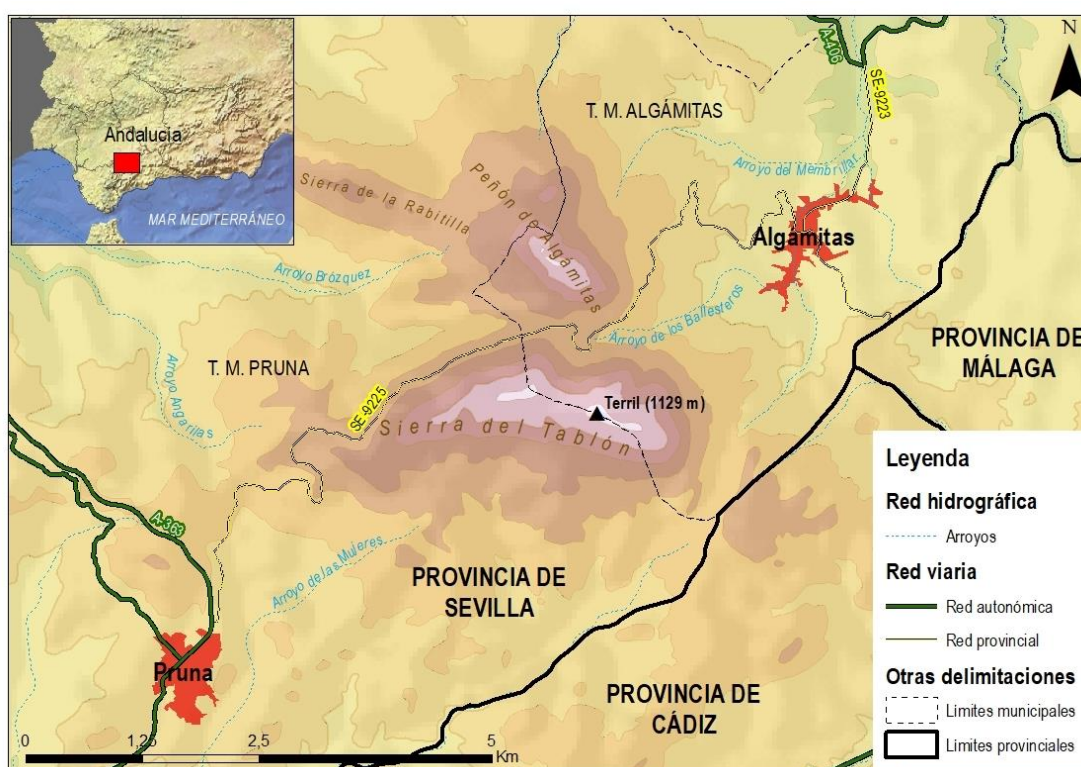
Los resultados obtenidos a partir de la consecución del objetivo de partida proporcionan un conocimiento inédito de la componente vegetal que en parte pobló la Sierra del Tablón en el pasado, lo que puede contribuir a consolidar los esfuerzos realizados hasta la fecha para reconstruir la paleobiogeografía de la Serranía de Ronda.

14.2. Métodos

14.2.1. Contexto territorial

La Sierra del Tablón (36°59'56"N; 5°10'23"W) (Figura 40) se localiza entre los municipios sevillanos de Pruna y Algámitas, pertenecientes a la demarcación territorial de la Sierra Sur de Sevilla, y constituye una de las estribaciones montañosas más septentrionales de la Serranía de Ronda entendida como conjunto montañoso ubicado en Andalucía. Forma parte del complejo serrano de Las Tres Sierras, integrado por tres macizos eminentemente calcáreos y bien diferenciados desde un punto de vista topográfico: la Sierra del Tablón propiamente dicha, donde se encuentra el punto culminante del conjunto montañoso y máxima altitud de la provincia de Sevilla (Terril, 1129 m s.n.m.); el Peñón de Algámitas (1121 m s.n.m.), al norte de la unidad anterior y separada de esta por el Puerto del Zamorano; y la Sierra de la Rabitilla, al noroeste de ambas (833 m s.n.m.).

Figura 40. Mapa de situación del ámbito de estudio.



Fuente: autoría propia a partir de la Red de Información Ambiental de Andalucía.

14.2.2. Caracterización geológica

Desde el punto de vista geológico, y según recoge el Instituto Geológico y Minero de España en las memorias asociadas a las hojas 1021, 1022, 1036 y 1037, la Sierra del Tablón pertenece al Subbético Interno de la Cordillera Bética, presentando una litología dominada por rocas carbonatadas mesozoicas, en esencia calizas margosas, calizas con sílex, dolomías y margocalizas principalmente jurásicas (localmente cretácicas), además de areniscas calcáreas bioclásticas neógenas y otros materiales recientes en forma de derrubios y depósitos de ladera.

14.2.3. Caracterización geomorfológica

Desde un punto de vista geomorfológico, la Sierra del Tablón presenta un perfil suave, alomado, que contrasta con el abrupto Peñón de Algámitas. Esto es debido al predominio de margocalizas y al remodelado causado por la gliptogénesis de ladera. De acuerdo con Díaz del Olmo (1981), la vertiente septentrional del Terril tiene un modelado general de tipo Richter que evidencia la herencia de un periodo frío (Würm), conservado gracias a la protección de la cubierta vegetal (Figura 41). En la ladera meridional, por su parte, hay excelentes ejemplos de movimientos en masa, que se ligan a procesos de reptación. Fruto de la naturaleza carbonatada y del carácter estructural del macizo, el Tablón está afectado por procesos de karstificación generalizados, destacando el desarrollo de lapiaces y la presencia de surgencias como las fuentes del Chapatal, del Duque y Alta, ubicadas en las partes basales. La red hidrográfica no presenta gran complejidad ni diversidad, destacando únicamente los siguientes elementos fluviales: Arroyo de las Mujeres, Arroyo Algámitas, Arroyo Brázquez, Arroyo de los Ballesteros y Arroyo del Membrillar. En conjunto, predominan los suelos delgados y pedregosos, asimilables a tipologías de leptosol-regosol calcáreo, que solo adquieren algo más de desarrollo en las posiciones topográficamente más llanas, collados y piedemonte de menor pendiente.

Figura 41. Contraste del relieve alomado de la Sierra del Tablón con el abrupto Peñón de Algámitas (izquierda). Detalle de la ladera norte del Terril estabilizada por la vegetación y de los depósitos de ladera descubiertos en una cantera (derecha).



Fuente: autoría propia.

14.2.4. Caracterización climática

El clima, de acuerdo con la clasificación climática elaborada por Olmedo-Cobo & Gómez-Zotano (2017) para el conjunto de la Serranía de Ronda, es de tipo mediterráneo semi-oceánico subhúmedo. Presenta una moderada influencia oceánica, lo que unido al carácter de pantalla que adquiere el macizo frente a los vientos del oeste y su relativa altitud, favorece un ambiente relativamente húmedo entre otoño y primavera, con una pluviosidad notable, que se estima cercana a o superior a los 1200 mm año⁻¹ en las cumbres, (934 mm año⁻¹ en Algámitas a 423 m s.n.m. y 803 mm año⁻¹ en Pruna a 549 m s.n.m.). Las temperaturas son suaves en invierno y moderadamente altas en verano, con episodios de calor intenso solo mitigados en las zonas más elevadas y gracias a la influencia oceánica, cuyo efecto se deja notar con prontitud cuando los vientos rolan a poniente; los valores medios anuales oscilan en cotas bajas entre los 15°C de la localidad de Algámitas y los 17°C de la cercana Olvera (540 m s.n.m.), destacando la escasa importancia de heladas durante el invierno, concentradas en los valles más profundos bajo situaciones de inversión térmica y en las cumbres durante advecciones intensas de aire frío.

14.2.5. Caracterización biogeográfica

Desde el punto de vista biogeográfico, a partir de lo establecido por Rivas-Martínez et al. (2017), se puede considerar que el macizo se encuentra en un área de transición entre los sectores Rondeño e Hispalense de la provincia Bética (región Mediterránea), incluso con cierta influencia florística del sector Gaditano –distrito Jerezano– de la provincia Gaditano-Onubo-Algarviense. En este contexto, y bajo unas condiciones bioclimáticas mesomediterráneas subhúmedas –localmente húmedas– y termomediterráneas seco-subhúmedas, la vegetación potencial corresponde a bosques esclerófilos de encinas y quejigos, que se enriquecen con especies termófilas en cotas bajas.

En concreto, se puede considerar como dominante la serie de vegetación *Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae*, definida como la serie bética de los bosques de *Quercus rotundifolia* Lam. con *Paeonia coriacea* Boiss., de carácter climatófilo, calcícola y dolomíticola, de distribución bioclimática mesomediterránea seco-húmeda (Rivas-Martínez et al., 2017). En este caso, la etapa clímax de encinar aparece acompañada de quejigos (*Quercus faginea* Lam.), siendo reconocible, por tanto, la subasociación *quercetosum faginae* del encinar bético. En cotas inferiores, la serie de vegetación se enriquece con elementos termófilos, a la vez que desaparecen localmente los taxones propios de las condiciones de mayor humedad, relegados a las posiciones superiores y umbrías principales. En cualquier caso, el aspecto de la etapa clímax de la serie de vegetación de todas las facies consideradas se encuentra notablemente degradado, predominando bien un encinar joven en regeneración, enriquecido con quejigos, acebuches (*Olea europaea* L.), madroños (*Arbutus unedo* L.) y puntualmente algarrobos (*Ceratonia siliqua* L.), bien un chaparral consecuencia de la regeneración vegetativa de *Q. rotundifolia* tras sucesivas talas para carboneo u obtención de leña décadas atrás (Figura

42). El dosel arbustivo preforestal y el matorral serial de degradación –principal formación vegetal del ámbito de estudio– lo integran taxones como *Q. coccifera* L., *Pistacia lentiscus* L., *Crataegus monogyna* Jacq., *Juniperus oxycedrus* L., *Cistus albidus* L., *Chamaerops humilis* L., *Lavandula lanata* Boiss., *Thymus mastichina* (L.) L., *Daphne gnidium* L., *Ulex parviflorus* Pourr. y *Phlomis purpurea* L.

Figura 42. Encinar joven en regeneración predominante en la Sierra del Tablón, orlado por una facies predominantemente arbustiva de *Q. coccifera*, *C. monogyna* y *J. oxycedrus*, aunque con elementos arborescentes (principalmente *P. lentiscus*). La degradación de ambas etapas deja paso a un matorral serial integrado esencialmente por *C. albidus*, *U. parviflorus* y *P. purpurea*. Allí donde la pendiente lo permite, el suelo está ocupado por el cultivo de olivar. Umbría del pico Terril.



Fuente: autoría propia.

Asimismo, estos encinares basales muestran una sucesiva transición hacia los acebuchales termófilos béticos de *Olea europaea*, asentados preferentemente sobre suelos arcillosos, y que son asimilables a la serie *Tamo communis-Oleeto sylvestris*, propia de ambientes termomediterráneos subhúmedo-húmedos. Sin embargo, conviene aclarar que estas formaciones de olivar silvestre, que en estado maduro están representadas por acebuchales acompañados de lentiscales de *P. lentiscus* con espinos negros (*Rhamnus lycioides* L. subsp. *oleoides* (L.) Maire), son difícilmente reconocibles en el ámbito de estudio, habiendo sido sustituidas en la mayor parte de los casos por aulagares-matorrales de degradación cuando no por cultivos.

14.2.6. Evolución reciente de la cubierta vegetal (1956-2019)

Este análisis se ha realizado mediante la diferenciación fisionómica de las principales formaciones vegetales existentes en el área de estudio para las dos fechas consideradas. Su delimitación se ha llevado a cabo utilizando ArcGis 10.1, siendo el criterio experto, a partir de la

vegetación existente en la actualidad, la clave fundamental para la digitalización de polígonos sobre la imagen aérea del año 1956 (habida cuenta de la inexistencia de fuentes de información fiables sobre coberturas vegetales y/o forestales para la época). En el primer caso, la delimitación de unidades actuales se sustenta, además, en el trabajo de campo, que ha consistido en el reconocimiento in situ de la flora predominante para la determinación de las formaciones vegetales que previamente habían sido delimitadas sobre fotografía aérea, con el objetivo de su comprobación y corrección mediante el SIG en caso necesario.

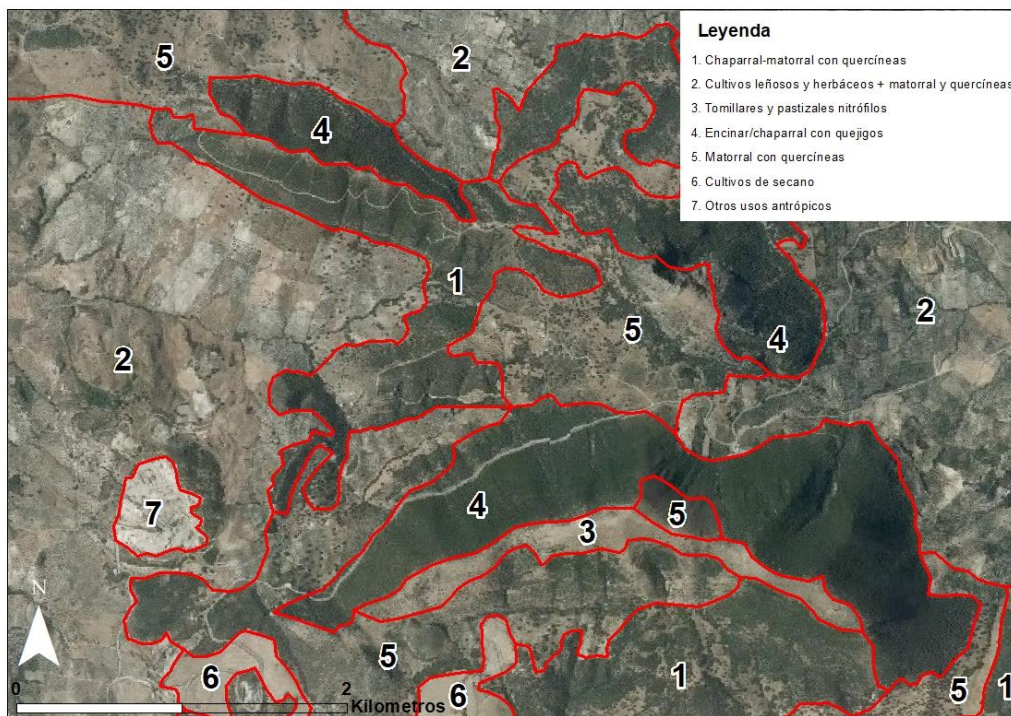
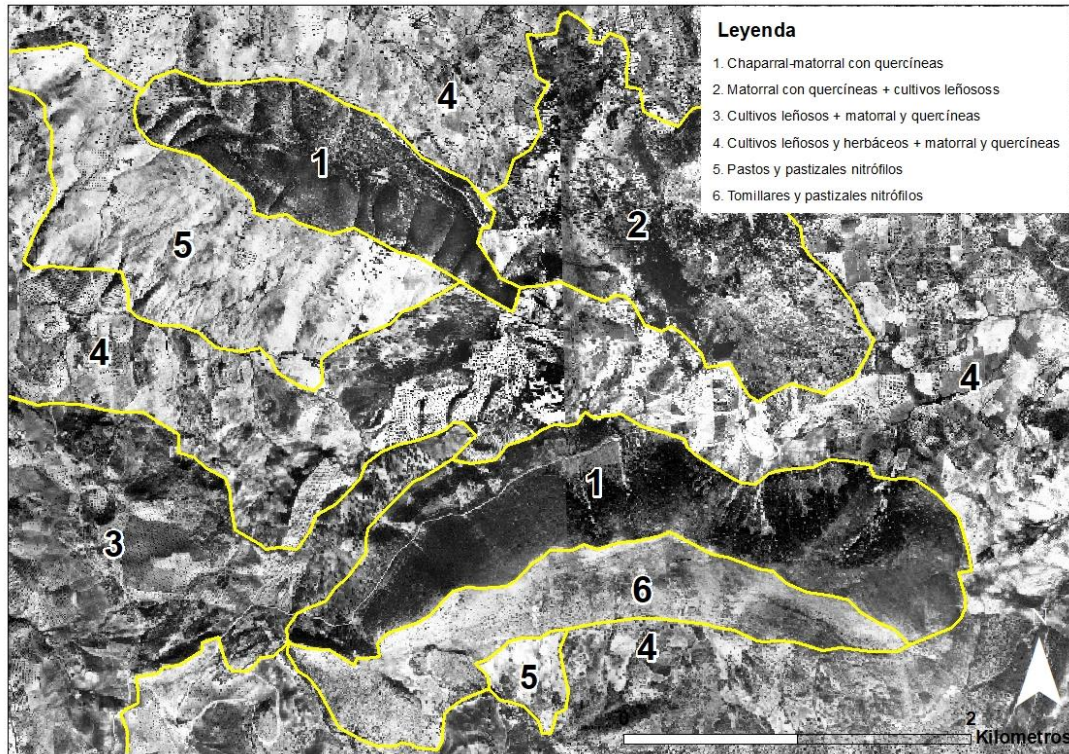
El análisis comparativo de las ortofotografías de los años 1956 y 2019 (Figura 43) muestra, en términos generales, un aumento significativo de la densidad vegetal en el área de estudio, en particular de las coberturas de matorral y arbustiva, y, en menor medida, de la de encinar joven-chaparral. Esta tendencia concuerda con la regeneración general de matorrales y, en menor medida, de bosques, que se ha producido a lo largo de la segunda mitad del siglo XX en la Serranía de Ronda, consecuencia del abandono parcial de muchas de las actividades tradicionales que sustentaba antaño el monte. En 1956 se puede comprobar como buena parte del piedemonte de la Sierra del Tablón, así como las lomas arcillosas circundantes (campaña), presentaban un aspecto de mosaico entre cultivos de secano (herbáceos y olivar principalmente) y restos de vegetación natural, fundamentalmente matorral, sin que las teselas de bosques fueran mínimamente destacables. En la actualidad, este espacio circundante sigue presentando esta dualidad de usos del suelo, habiéndose dado un retroceso de la campaña cerealista a favor de la campaña olivarera; también se aprecia cierto aumento de la densidad del matorral, que en muchos casos aparece enriquecido con encinas y quejigos, árboles que puntualmente han conseguido prosperar hasta formar pequeños bosquetes todavía inmaduros.

En la sierra propiamente dicha cabe destacar, en primer lugar, la elevada densidad del matorral que existía en 1956 en la umbría del pico Terril, incluso con rodales de encinar o chaparral —presumiblemente con quejigos—; un hecho que se puede relacionar con la fuerte pendiente de estas laderas, lo que seguramente permitió la conservación, aunque degradada, de la cubierta vegetal leñosa en su conjunto. En contraste, la parte cimera presentaba un recubrimiento muy ralo debido al pastoreo, dado su perfil suave y mayor accesibilidad desde la ladera de mediodía, cuya vegetación aparecía igualmente muy castigada; es de suponer, a juzgar por la imagen, que, junto a las pequeñas e irregulares manchas de encinar-chaparral que se pueden reconocer en la imagen del año 1956, predominasen pastos herbáceos y tomillares nitrófilos propios de áreas intensamente pastoreadas. Asimismo, y como antes se señalaba, la menor pendiente de la ladera favorecía en este caso la aparición de extensiones roturadas para cultivos de secano.

La evolución de la vegetación desde entonces ha estado marcada por un progresivo aumento de la densidad vegetal de las diferentes facies leñosas, habiéndose convertido la umbría del pico Terril en un denso entramado de matorral y formaciones arbustivas arborescentes, acompañadas de encinas y quejigos, con extensiones variables de chaparral-encinar joven. La arista y la zona superior de la ladera solana siguen siendo las partes más degradadas por el

pastoreo, prevaleciendo —como en 1956— formaciones de pastos herbáceos y tomillares nitrófilos. En cotas inferiores, el mosaico entre cultivos y vegetación todavía es una realidad, aunque se aprecia claramente un aumento en la densidad del matorral y del número y tamaño de encinas, con algunos rodales arbolados que constituyen incipientes bosques.

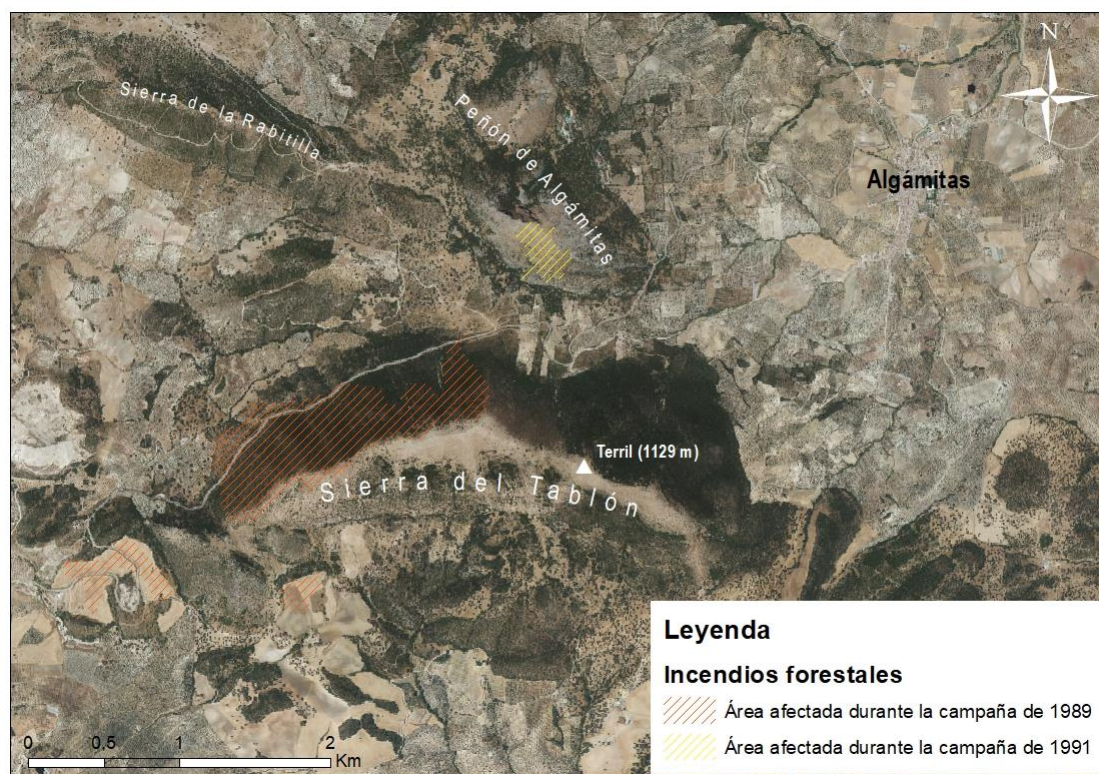
Figura 43. Ortofotografías de la Sierra del Tablón correspondientes al vuelo americano del año 1956 (arriba) y al vuelo PNOA del año 2019 (abajo).



Fuente: autoría propia a partir de la información disponible en el Centro Nacional de Información Geográfica y la Red de Información Ambiental de Andalucía.

Este proceso de regeneración, maduración e incremento de la densidad de las diferentes coberturas vegetales leñosas (de matorral, arbustivas y de arbolado) se ha visto frenado, no obstante, por dos incendios forestales sucedidos en 1989 y 1991, que calcinaron respectivamente 94.4 y 8.46 hectáreas (Araque-Jiménez 2013) (Figura 44).

Figura 44. Áreas afectadas por los incendios forestales en 1989 y 1991.



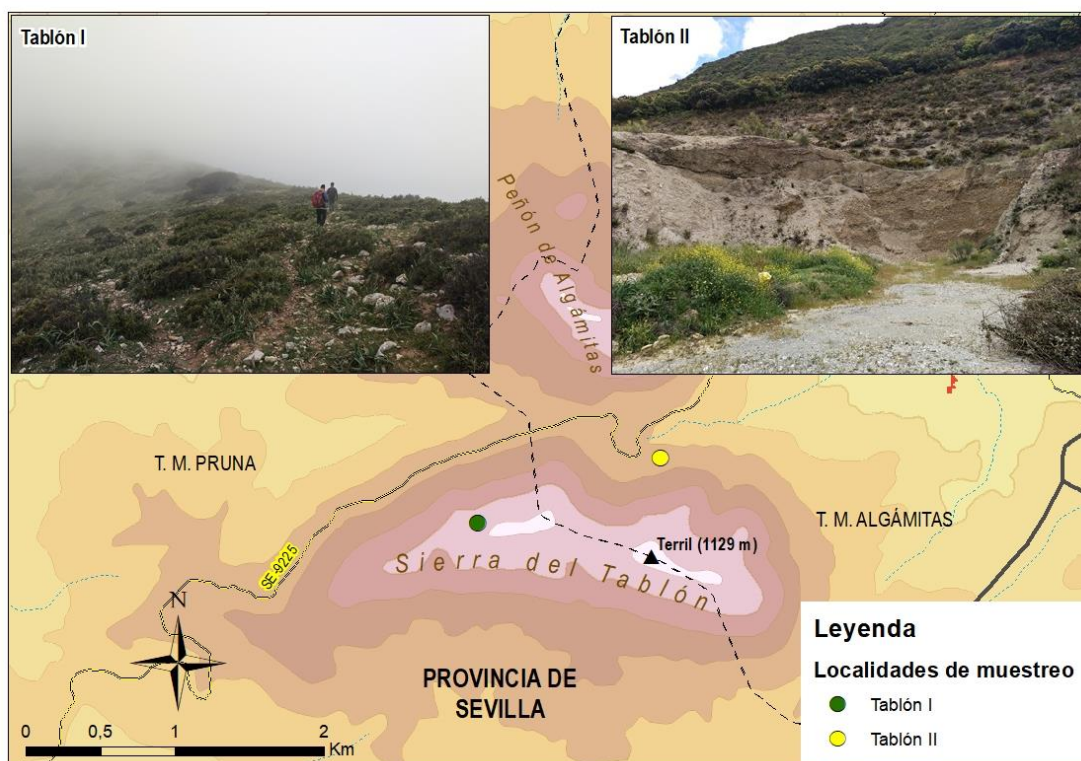
Fuente: autoría propia a partir de la Red de Información Ambiental de Andalucía.

14.2.7. Análisis pedoantracológico

Para acometer la aproximación paleobiogeográfica en el ámbito de estudio se ha empleado la pedoantracología como metodología principal de trabajo. Este método consiste en la toma de muestras de suelo para la búsqueda e identificación de carbones procedentes de incendios forestales, permitiendo reconstruir con gran precisión espacial la historia de la vegetación leñosa quemada en diferentes episodios de fuego. Más concretamente, se ha adoptado la secuencia de etapas de trabajo propuesta por Cunill (2010), la cual consta de las siguientes etapas de trabajo:

(1) Trabajo de campo. Se han llevado a cabo dos catas pedológicas en sendas localidades de muestreo (Figura 45, Tablas 14 y 15). La elección de ambas localizaciones se ha encontrado condicionada por factores como la presencia de suelos relativamente profundos y la existencia de pendientes no demasiado pronunciadas (<15 %). Tras la excavación, se ha procedido a la recogida de muestras de suelo (entre 3 y 10 kg por nivel de muestreo, correspondientes con cada uno de los horizontes edáficos).

Figura 45. Localidades de muestreo en la Sierra del Tablón.



Fuente: autoría propia a partir de la Red de Información Ambiental de Andalucía.

Tabla 14. Datos geográficos de la localidad de muestreo Tablón I.

Tablón I	
Coordenadas (ETRS89)	37°00'01"N; 5°11'10"W (X = 305459; Y = 4097156)
Altitud (m s.n.m.) y bioclima	1066 – Mesomediterráneo subhúmedo
Ambiente geocológico	Ladera N (pendiente del 15 %) – Prado subnitrófilo en claro de encinar en regeneración
Sustrato y tipo de suelo	Calizas margosas negras; regosol-leptosol calcáreo con moderada pedregosidad de tamaño medio
Profundidad del muestreo (cm)	93
Niveles de muestreo	3
Vegetación y biogeografía	Prado en claro de encinar en regeneración. Subsector Rondense, Sector Rondeño, Provincia Bética.
Inventario florístico y serie fitosociológica	<i>Quercus rotundifolia</i> (3), <i>Cistus albidus</i> (2), <i>Quercus coccifera</i> (1), <i>Crataegus monogyna</i> (1), <i>Asphodelus</i> sp. (1), <i>Orchis lutea</i> (+), <i>Paeonia coriacea</i> (+), <i>Thymus mastichina</i> (+), <i>Genista</i> sp. (+), <i>Chamaerops humilis</i> (+), <i>Daphne gnidium</i> (+), <i>Pistacia lentiscus</i> (+). Serie: <i>Paeonio-Querceto rotundifoliae quercetosum faginae</i> .

Fuente: autoría propia.

Tabla 15. Datos geográficos de la localidad de muestreo Tablón II.

Tablón II	
Coordenadas (ETRS89)	37°00'16"N; 5°10'21"W (X = 306685; Y = 4097598)
Altitud (m s.n.m.) y bioclima	738 – Mesomediterráneo inferior-termomediterráneo superior subhúmedo
Ambiente geocológico	Ladera N-NW (pendiente del 10 %) – Encinar con quejigos y madroños
Sustrato y tipo de suelo	Calizas margosas negras y margocalizas; regosol-leptosol calcáreo con moderada pedregosidad de tamaño medio
Profundidad del muestreo (cm)	64
Niveles de muestreo	3
Vegetación y biogeografía	Encinar con quejigos y madroños. Subsector Rondense, Sector Rondeño, Provincia Bética.
Inventario florístico y serie fitosociológica	<i>Quercus rotundifolia</i> (4), <i>Quercus faginea</i> (+), <i>Arbutus unedo</i> (+), <i>Lonicera</i> sp. (2), <i>Cistus albidus</i> (2), <i>Crataegus monogyna</i> (1), <i>Cistus salviifolius</i> (+), <i>Ulex parviflorus</i> (+), <i>Genista</i> sp. (+), <i>Rosa canina</i> (+), <i>Phlomis purpurea</i> (+), <i>Pistacia lentiscus</i> (+), <i>Chamaerops humilis</i> (+), <i>Rubia peregrina</i> (+). Serie: <i>Paeonio-Querceto rotundifoliae</i> faciación termófila (transición a PQ hispalense).

Fuente: autoría propia.

(2) Trabajo de laboratorio. La segunda etapa corresponde al análisis antracológico en laboratorio que supone el tratamiento de las muestras mediante:

- Tamizado con agua a través de cribas de 0.8, 2 y 5 mm de las muestras de suelo recogidas en campo.
- Triado del carbón —desechando la fracción mineral residual— para su posterior análisis al microscopio.
- Cálculo de antracomasa, valor que relaciona el peso en miligramos del carbón recuperado en cada nivel de muestreo con el peso en kilogramos de la muestra una vez se le resta a esta el peso del material mineral atrapado —sobrante— en la luz de malla de 5 mm.
- Identificación taxonómica de los carbones seleccionados mediante el empleo de un microscopio óptico de luz reflejada Olympus BX 51 (50x, 100x, 200x y 500x) y de una lupa binocular C-LEDS. Las muestras han sido preparadas convenientemente para su identificación. Mediante pinzas y bisturí se han realizado diferentes cortes con el objetivo de distinguir los tres planos anatómicos de la madera (plano transversal, plano longitudinal tangencial y plano longitudinal radial), requisito fundamental para discriminar características anatómicas clave. Esta tarea se ha apoyado en los diferentes manuales de taxonomía de maderas existentes (Vernet et al., 2001), así

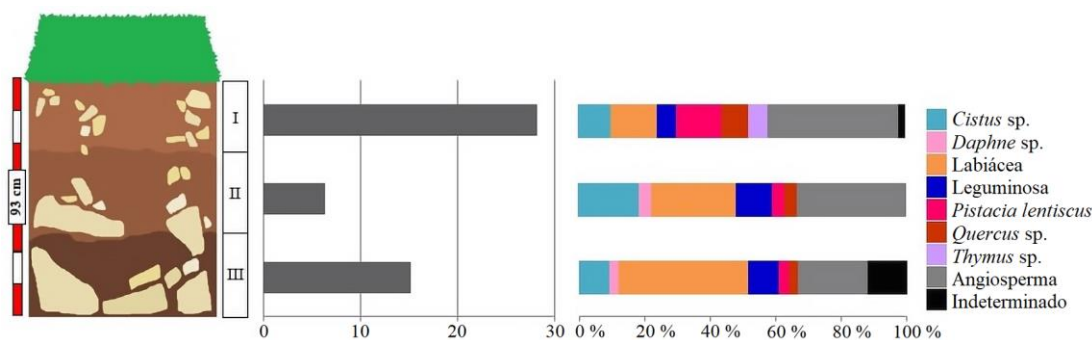
como en la colección de leñosas carbonizadas disponible en la antracoteca del laboratorio de Geografía Física de la Universidad de Granada. El número máximo de carbones por cada nivel de muestreo ha oscilado entre 50 y 100 fragmentos.

- Datación de muestras en el laboratorio especializado Alfred Wegener Institute (Bremerhaven, Alemania) y su posterior calibración con el programa Oxcal 4.4 y la base de datos IntCal20, 2 sigma (95 % probabilidad).

14.3. Resultados

El primer muestreo (37°00'01"N; 5°11'10"W) (Figura 46), de una profundidad de 93 cm y 3 niveles edáficos, se ha llevado a cabo en las proximidades de la cumbre El Terril, a una altitud de 1066 m s.n.m. –piso bioclimático mesomediterráneo subhúmedo–. El enclave seleccionado ha sido un pequeño rellano de moderada pendiente, con un suelo de tipo regosol-leptosol calcáreo, con moderada pedregosidad de tamaño medio. La fitocenosis dominante en este lugar corresponde a un encinar aclarado, en parte achaparrado, en fase de regeneración, destacando taxones como *Q. rotundifolia*, *C. monogyna*, *Asphodelus* sp. y *C. albidus*, y en menor medida *Q. coccifera*, *T. mastichina*, *Genista cinerea* (Vill.) DC., *P. lentiscus*, *C. humilis* y *D. gnidium*. En las posiciones más abiertas se desarrollan prados subnitrófilos debido al frecuente paso de ganado doméstico, habiendo sido en uno de estos claros donde se efectuó en muestreo al constatarse un mayor espesor edáfico.

Figura 46. Perfil edáfico, valores de antracomasa (mg kg⁻¹) y taxones identificados por nivel de muestreo en Tablón I.



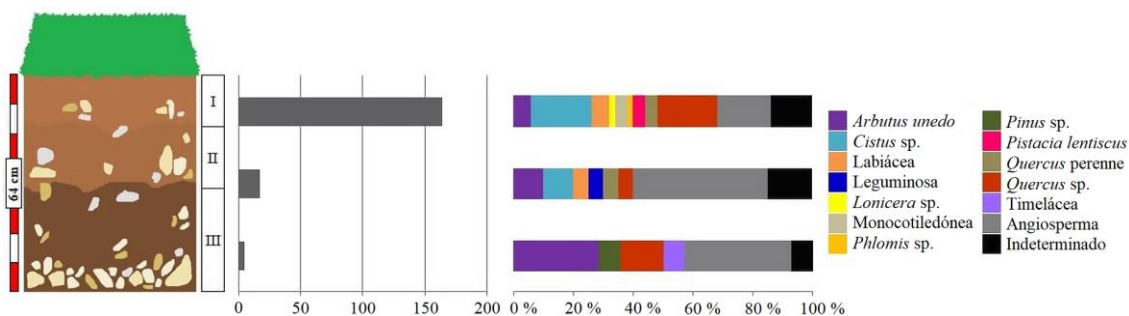
Fuente: autoría propia.

La cantidad de carbón encontrada ha sido muy escasa, en concreto un total de 109 fragmentos de diferente tamaño, que en su conjunto han supuesto una antracomasa de 49.7 mg kg⁻¹ (28.2 en el nivel I; 6.3 en el nivel II; y 15.2 en el nivel III). Respecto a las identificaciones taxonómicas de las 109 muestras, han predominado las familias de las labiáceas (27 fragmentos, 25 % del total) y, en menor medida, las leguminosas (8 muestras, 7 % del total). En cuanto a géneros, es *Cistus* con un 11 % del total de los carbones identificados el más representativo. A este lo acompañan *Quercus*, sin que haya podido establecerse su carácter arbóreo/arbustivo ni perennifolio/caducifolio al no alcanzarse el nivel de identificación de especie, y *Thymus*, con una representatividad del 6 y del 3 % respectivamente. Otros géneros, como *Genista* y

Daphne, apenas suponen un 2 % del total de fragmentos analizados. A nivel de especie, solo destaca la aparición de *P. lentiscus*, con un 8 % del total de fragmentos analizados y una mínima presencia de *A. unedo*. Especial atención merecen los carbones vitrificados, que representan un 39 % del total (42 de los 109 carbones identificados), estando integrados por fragmentos sin identificar (indeterminados) o bien por muestras atribuidas a angiospermas sin que haya sido posible alcanzar una mayor precisión en la identificación.

El segundo muestreo (37°00'16"N; 5°10'21"W) (Figura 47) se ha realizado a 738 m s. n. m. en la vertiente noroccidental de la Sierra del Tablón. Se trata de una ladera con una pendiente del 10 %, con suelos de tipo regosol-leptosol calcáreo, con moderada pedregosidad de tamaño medio, y que se localiza en la transición entre los pisos bioclimáticos mesomediterráneo inferior y termomediterráneo superior, bajo condiciones subhúmedas. Se han podido tomar muestras de tres niveles edáficos en un perfil de 64 cm de profundidad, en un ambiente ecológico marcado por el desarrollo de un encinar (*Q. rotundifolia*) con quejigos (*Q. faginea*) y madroños (*A. unedo*), en el que son frecuentes arbustos preforestales y de especies del matorral de degradación como *Lonicera* sp., *C. monogyna*, *Rosa canina* L., *G. cinerea*, *P. lentiscus*, *C. albidus*, *C. salvifolius* L., *U. parviflorus*, *P. purpurea* y *C. humilis*.

Figura 47. Perfil edáfico, valores de antracomasa (mg kg⁻¹) y taxones identificados por nivel de muestreo en Tablón II.



Fuente: autoría propia.

En este caso, el valor global de antracomasa ha sido significativamente mayor que en la localidad anterior, situándose en 186.4 mg kg⁻¹ (84 fragmentos), si bien no deja de ser una tasa notablemente baja. Ha sido el nivel más superficial (I) el que ha presentado el valor de antracomasa más alto, con 163.7 mg kg⁻¹, disminuyendo este valor a mayor profundidad (17.7 mg kg⁻¹ en el nivel II y 5 mg kg⁻¹ en el nivel III). Respecto al análisis taxonómico, una vez sometidos a identificación el total de los 84 carbones recuperados, destaca el porcentaje de fragmentos atribuidos a los géneros *Quercus* (24 %) y *Cistus* (18 %), mientras que *Pistacia*, *Phlomis* y *Lonicera* apenas tienen una representatividad del 2 %, además de otras muestras pertenecientes a las familias de las labiáceas y las timeláceas (5 y 2 %, respectivamente). A nivel de especie, solo se han podido diferenciar algunos fragmentos de *Quercus* sp. perennes sin que, al igual que en Tablón I, haya sido posible discriminar entre taxones arbóreos y arbustivos, además de *A. unedo*, en este caso con una representación de un 7 % del total de las muestras. Por último, los carbones vitrificados también tienen una significación importante,

con más de un 30 % considerando las muestras atribuidas a angiospermas y aquellas en las que no ha sido posible determinación alguna (indeterminados).

Una vez concluida la fase de identificación, y atendiendo al objetivo general de la investigación, se ha priorizado la identificación de muestras correspondientes a taxones arbóreos ya que estos constituyen –por encima de los de carácter arbustivo– los mejores indicadores para la reconstrucción, en este caso, de la historia de las comunidades boscosas. Siguiendo esta pauta, se sometió a datación radiocarbónica un total de 4 fragmentos de carbón, tres de los cuales procedentes del material recuperado en el muestreo de Tablón II (dos correspondientes a *Quercus* sp. y uno a *Pinus* sp.) y uno más (*Quercus* sp.) de las muestras de Tablón I (Tabla 16).

Tabla 16. Dataciones radiocarbónicas obtenidas para diferentes fragmentos de los géneros *Quercus* (3) y *Pinus* (1).

Localización	Código de laboratorio	Nivel de muestreo	Taxón	Edad convencional (C ¹⁴ años BP)	Edad calibrada (años BP) (95 %)
Tablón I	TEIII - 18	III	<i>Quercus</i> sp.	1560 ± 16	1500–1455
Tablón II	TAlII - 3	III	<i>Quercus</i> sp.	151 ± 54	286–156
	TAlII - 4	III	<i>Quercus</i> sp.	8594 ± 22	9643–9566
	TAlII - 8	III	<i>Pinus</i> sp.	11 767 ± 108	14 013–13 440

Fuente: autoría propia.

En el caso de Tablón I, la única muestra datada, correspondiente a un fragmento de *Quercus* sp. encontrado en el nivel III del muestreo, presenta una antigüedad de 1500–1455 años cal BP, sin que se haya podido precisar la especie concreta o si se trataba de *Quercus* perenne o *Quercus* caduco. Notablemente más antiguas son las dos cronologías milenarias obtenidas para sendos fragmentos de *Quercus* sp. y *Pinus* sp. de Tablón II, ambos recuperados del nivel III; en el primer caso, se trata de un fragmento con una edad de 9643–9566 años cal BP, sin que tampoco se haya podido alcanzar la identificación a nivel de especie, mientras que en el caso de la muestra de *Pinus* sp., esta presenta una antigüedad de 14 013–13 440 años cal BP. Cabe destacar, en este último caso, que este fragmento de *Pinus*, como género vegetal, no encuentra representación actual en el ámbito de estudio, lo que podría resultar un aspecto clave para detectar cambios en la dinámica vegetal de este sector en torno al comienzo del máximo Tardiglaciario. Finalmente, el tercer fragmento datado de Tablón II corresponde a otra muestra de *Quercus* a nivel de género (también hallada en el nivel III), aunque en este caso se trata de un carbón de origen más reciente, con una edad de 286–156 años cal BP.

14.4. Discusión

El estudio pedoantracológico realizado durante esta investigación, junto a la datación radiocarbónica de diferentes fragmentos de carbón (3 del género *Quercus* y 1 del género *Pinus*), han posibilitado un primer acercamiento a la paleoecología del sector más septentrional

de la Serranía de Ronda, lo que resulta un avance inicial, aunque significativo, en el conocimiento paleobiogeográfico de esta región habida cuenta de la total ausencia hasta el momento de este tipo información.

En primer lugar, cabe destacar que, de las diferentes cronologías obtenidas, sobresale la antigüedad de la muestra datada de *Pinus* sp., que se remonta a hace 14 013–13 440 años cal BP, la mayor hasta la fecha para el conjunto de la Serranía de Ronda según los estudios recogidos en Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo (2021). Un hallazgo que podría ayudar a desvelar que determinadas formaciones de coníferas, en este caso pinares, formaron parte del paisaje vegetal de este sector durante el Tardiglaciario. En este sentido, Badal et al. (2013) confirman la existencia de pinares durante finales del Solutrense (15 000 años BP) en cotas bajas del sur peninsular (<1000 m s.n.m.) a partir de registros sedimentarios obtenidos en las cuevas litorales de Gorham (Gibraltar) y Nerja (Málaga), en un periodo donde las actuales condiciones de los pisos bioclimáticos supramediterráneo superior/oromediterráneo serían las protagonistas en el ámbito de estudio. Paralelamente, varios registros palinológicos y antracológicos han revelado la presencia milenaria de diferentes especies de *Pinus* altimontanas –en concreto *P. nigra* Arnold y *P. sylvestris* L.– en el flanco suroccidental de la Bética y costa sur peninsular (Carrión et al., 2008, 2010; López-Sáez et al. 2008; Fernández et al., 2021). Por tanto, es plausible que, bajo condiciones sensiblemente más frías que las actuales, determinadas especies de *Pinus*, hoy consideradas de alta montaña en la Bética, formasen parte del estrato arbóreo de la Sierra del Tablón a finales del Pleistoceno.

Esta hipótesis queda reforzada, además, por el reciente hallazgo de carbón de *Pinus* sp. con cronologías diez-milenarias en la cercana Sierra de Jarastepar (Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo 2021), y, asimismo, a partir de la constatación del rol que *P. pinaster* Aiton tuvo en los paisajes béticos del Pleistoceno Inferior y Holoceno (Carrión et al., 2004; Gómez-Zotano et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2019). Otra cuestión que se puede discutir, considerando la ausencia en la actualidad de formaciones de *Pinus* en el área de estudio, así como en su entorno montañoso más inmediato, es cuándo se produjo su retraimiento en este extremo noroccidental de la Serranía. En este sentido, durante los primeros compases del Holoceno, la progresiva instauración de condiciones ambientales más cálidas y secas en el sur de la península ibérica (Jalut et al., 2000; Cacho et al., 2001) podría haber favorecido la gradual sucesión de estas coníferas a favor de taxones más termófilos, como *Quercus* sp. A partir de toda esta información se podría inferir el posible papel de refugio glacial que pudo desempeñar la Sierra del Tablón para ciertas coníferas –al menos para un taxón correspondiente al género *Pinus*– durante las últimas fases del Pleistoceno, coincidiendo con un periodo de trascendental importancia desde el punto de vista paleoambiental (López-Sáez et al., 2008).

En cualquier caso, este hallazgo incorpora la Sierra del Tablón al conjunto de territorios de la Cordillera Bética y de otras amplias regiones del sur peninsular, para los que se ha constatado el importante papel ecológico que determinados bosques de coníferas (pinares, abetales, sabinas) habrían tenido en sus paisajes vegetales durante el Cuaternario, en particular en la

transición Pleistoceno-Holoceno (Carrión et al., 2004, 2010; Badal et al., 2013). No obstante, la imposibilidad de concretar la especie y el hecho de que estas hipótesis para el caso de la Sierra del Tablón se consideren a partir de una sola muestra de *Pinus*, obliga a ser cautos, y aconseja en cualquier caso el desarrollo de nuevos trabajos de campo en la localidad para confirmar o refutar la misma, así como para reforzar y ampliar las conclusiones que se puedan extraer, en su caso, respecto a la presencia pretérita de *Pinus* en este macizo.

Por lo que respecta a las cronologías obtenidas para los 3 fragmentos de *Quercus* sp. sometidos a datación, se puede confirmar la presencia de este taxón durante los últimos 10 000 años en el área de estudio. Sin embargo, al igual que ha sucedido con el fragmento hallado de *Pinus*, la identificación taxonómica de las muestras pertenecientes al género *Quercus* no ha permitido de manera general determinar el nivel de especie. Puntualmente, sí se ha podido discriminar el carácter perenne de unos pocos fragmentos de *Quercus*, aunque tampoco se ha podido establecer si se trata de muestras pertenecientes a árboles o arbustos, en este caso *Q. coccifera*, y en el caso de los primeros, si eran perennes, asimilables a *Q. rotundifolia*, o caduco-marcescentes, atribuibles a *Q. faginea* o, incluso, *Q. pyrenaica* Willd. o *Q. canariensis* Willd.

En este sentido, si bien es cierto que la caracterización climática realizada para el conjunto de la Serranía de Ronda determina un ombroclima húmedo (>1000 mm anuales) en este sector (Olmedo-Cobo & Gómez-Zotano, 2017), la escasa representación actual de *Q. faginea* en el macizo, junto a la exigua presencia de otras formaciones de quercíneas caducifolias y/o marcescentes (robledales de *Q. pyrenaica* y quejigales morunos de *Q. canariensis*) en el conjunto del extremo occidental de la Cordillera Bética, permite considerar que el fragmento del género *Quercus* con una antigüedad de 286–156 años cal BP pertenecería con mayor certeza a una quercínea perennifolia, bien *Q. rotundifolia* bien *Q. coccifera*.

Por tanto, se puede afirmar que la vegetación esclerófila dominante en la actualidad pudo haber integrado un paisaje mixto de coníferas y frondosas hacia finales del Pleistoceno, dejando paso durante el Holoceno a una floresta dominada por especies del género *Quercus*, con alta probabilidad de que el encinar fuese preponderante respecto al quejigal al final del periodo, habiéndose enriquecido paulatinamente de especies termófilas como *P. lentiscus* y *A. unedo*, tal y como atestigua el análisis pedoantracológico.

Por otra parte, los reducidos valores de antracomasa detectados sugieren la escasa incidencia que el fuego podría haber tenido en el pasado en el macizo. Sin embargo, y tal y como sucede en otros enclaves de naturaleza carbonatada de la Serranía de Ronda, este hecho podría explicarse por la reducida capacidad de los suelos derivados de sustratos calizo/dolomíticos para retener el carbón (Pardo-Martínez, 2020). Además, la importancia que los incendios forestales han tenido en la configuración del paisaje vegetal de la Bética queda fuera de toda duda, siendo al mismo tiempo un elemento clave para explicar su enorme biodiversidad florística (Bond & Keeley, 2005).

En cualquier caso, las cuatro dataciones se asocian a intervalos temporales que no se solapan entre sí, por lo que, inequívocamente, corresponden a cuatro eventos de fuego distintos, y que en última instancia ayudaron a configurar el paisaje vegetal actual. La contextualización de esta información con los registros arqueológicos, antracológicos y paleoambientales advierte del carácter natural de las perturbaciones de mayor antigüedad (14 013–13 440 y 9643–9566 años cal BP), coincidiendo con el fin del Máximo Glacial y con la llegada de condiciones ambientales más cálidas y secas respectivamente (Jalut et al., 2000). Por su parte, el evento de 1500–1455 años cal BP podría estar relacionado con el intenso proceso de deforestación que comenzaría en época romana en la zona (López-García & López-Sáez, 1997; Rodríguez-Ariza & Esquivel, 2004). Esta dinámica negativa para la conservación del estrato arbóreo se prolongaría durante los últimos siglos, como atestigua el último de los eventos de fuego detectado (286–156 años cal BP), si bien la repercusión sería mayor en los sectores central y meridional de la Serranía de Ronda (Alba-Sánchez et al., 2021), manteniéndose el flanco septentrional relativamente al margen de estos intensos procesos de explotación forestal desordenada y consiguiente degradación de la vegetación (López-García & López-Sáez, 1997).

La información colectada, puesta en relación con otros análisis paleoecológicos e históricos, puede resultar de utilidad para el desarrollo de estrategias conducentes a la recuperación de aquellos hábitats vegetales hoy desaparecidos y/o muy degradados, siempre y cuando las condiciones ecológicas actuales lo permitan. Es esta una cuestión especialmente relevante en el contexto actual de gestión forestal adaptativa frente al cambio climático en este tipo de enclaves montañosos donde la biota en general está profundamente alterada a consecuencia del uso antrópico del territorio.

14.5. Conclusiones

La presente investigación ayuda a consolidar los esfuerzos realizados hasta la fecha para implementar la pedoantracología en los estudios paleoecológicos en la Serranía de Ronda. Las evidencias antracológicas halladas en la Sierra del Tablón aportan nueva información paleobiogeográfica que favorece el debate de las siguientes cuestiones:

- a. La posible mayor diversidad arbórea durante la transición Pleistoceno-Holoceno en la Serranía de Ronda.
- b. La dinámica de colonización de *Pinus* habida cuenta de su segura presencia en el pasado pese al aislamiento geográfico de la Sierra del Tablón.
- c. La antigüedad del carbón de *Pinus* –la mayor hasta la fecha en el conjunto de la Serranía de Ronda– convertiría a la Sierra del Tablón en un posible refugio glacial de ciertas coníferas, tal y como se ha confirmado para otras especies de *Pinus* en determinadas áreas de la Serranía de Ronda.

En cualquier caso, es necesario nuevo trabajo de campo para confirmar o refutar estas hipótesis, y seguir, con ello, desentrañando la paleobiogeografía del conjunto de las Tres

Sierras en el que se integra la Sierra del Tablón, el cual resulta claramente deficitario en el contexto de la Serranía de Ronda. Los esfuerzos futuros deberán encaminarse hacia la realización de nuevos muestreos pedoantracológicos y a la transferencia de los resultados de la investigación a las administraciones públicas y a empresas privadas con competencias en la gestión de los recursos forestales de esta emblemática sierra; la propuesta de un modelo de conectividad ecológica de los bosques de las Tres Sierras con el resto de la Serranía de Ronda, fundamentada en el conocimiento pasado (reconstrucción paleobiogeográfica), podría ser una herramienta de trabajo efectiva para la gestión adaptativa de las masas forestales frente al Cambio Climático.

Referencias

- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Abel-Schaad, D., Sabariego, S., Pérez-Díaz, S. et al. (2021). Dinámica de las formaciones boscosas de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. en la Sierra de las Nieves durante el Holoceno Final. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 163–181). Editorial La Serranía.
- Alcalde, C., García-Amorena, I., García-Álvarez, S., García-Calvo, D., García-García, R. et al. (2006). Contribución de la paleofitogeografía a la interpretación del paisaje vegetal ibérico. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 15(1), 40–54.
- Araque-Jiménez, E. (2013). Medio siglo de grandes incendios forestales en Andalucía (1961-2011). *Méditerranée: Revue géographique des pays méditerranéés*, 121, 41–52. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.6840>
- Badal, E., Carrión, Y., Figueiral, I. & Rodríguez-Ariza, M.O. (2013). Pinares y enebrales: El paisaje solutrense en Iberia. *Espacio Tiempo y Forma Serie I, Nueva época Prehistoria y Arqueología*, 5, 259–271. <https://doi.org/10.5944/etf i.5.5385>
- Bond, W.J. & Keeley, J.E. (2005). Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>
- Cacho, I., Grimalt, J., Canals, M., Sbaiffi, L., Shackleton, N.J. et al. (2001). Variability of the western Mediterranean Sea surface temperature during the last 25,000 years and its connection with the Northern Hemisphere climatic changes. *Paleoceanography*, 16, 40–52. <https://doi.org/10.1029/2000PA000502>
- Carrión, J.S., Yll, E.I., Willis, K.J. & Sánchez-Gómez, P. (2004). Holocene forest history of the Eastern plateaux in the Segura Mountains (Murcia, southeastern Spain). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 132(3-4), 219–236. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2004.07.002>

- Carrión, J.S., Finlayson, C., Fernández, S., Finlayson, G., Allué, E. et al. (2008). A coastal reservoir of biodiversity for Upper Pleistocene human populations: Palaeoecological investigations in Gorham's Cave (Gibraltar) in the context of the Iberian Peninsula. *Quaternary Sciences Reviews*, 27(23-24), 2118–2135. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.016>
- Carrión, J.S., Fernández, S., González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Badal, E. et al. (2010). Expected trends and surprises in the Lateglacial and Holocene vegetation history of the Iberian Peninsula and Balearic Islands. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 162(3), 458–475. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2009.12.007>
- Choe, H., Thorne, J.H. & Seo, C. (2016). Mapping national plant biodiversity patterns in South Korea with the MARS species distribution model. *PLOS ONE*, 11(3), e0149511. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149511>
- Costa, M., García, M., Morla, C. & Sainz, H. (1990). La evolución de los bosques de la Península Ibérica: una interpretación basada en datos paleobiogeográficos. *Ecología*, 1, 31–58.
- Cunill, R. (2010). *Estudi interdisciplinari de l'evolució del límit superior del bosc durant el període holocènic a la zona de Plaús de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català* (Tesis Doctoral). Universidad Autònoma de Barcelona.
- Díaz del Olmo, F. (1981). Planteamientos para el análisis geomorfológico de la Sierra del Tablón (Área subbética de Sevilla). *Estudios Geográficos*, 42(164), 325–330.
- Fernández, S., Carrión, J.S., Ochando, J., González-Sampériz, P., Munuera, M. et al. (2021). New palynological data from the Late Pleistocene glacial refugium of South-West Iberia: The case of Doñana. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 290, 104431. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2021.104431>
- Guisan, A. & Zimmermann, N. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3), 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00354-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00354-9)
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Martínez-Ibarra, E. (2017). Descubrimiento y caracterización geográfica de una depresión ultramáfica en Sierra Bermeja: nuevos datos geomorfoedáficos, fitogeográficos y paleoecológicos. *Pirineos*, 172. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172001>
- Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal*. Editorial La Serranía.
- Jalut, G., Esteban, A., Bonnet, L., Gauquelin, T. & Fontugne, M. (2000). Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(3-4), 255–290. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00075-4)

- López-García, P. & López-Sáez, J.A. (1997). Contribución al conocimiento de la historia de la vegetación de la provincia de Sevilla: Análisis polínico del yacimiento arqueológico de «Los Molares». *Mediterránea*, 16, 19–22. <https://doi.org/10.14198/MDTRRA1997.16.02>
- López-Sáez, J.A., López-Merino, L. & Pérez-Díaz, S. (2008). Historia de la vegetación: una aproximación arqueopalinológica. *Antiquitas*, 20, 41–47.
- Miller, J. (2010). Species Distribution Modeling. *Geography Compass*, 4(6), 490–509. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00351.x>
- Olmedo-Cobo, J.A. & Gómez-Zotano, J. (2017). Los climas de la Serranía de Ronda: una propuesta de clasificación. *Takurunna*, 6-7, 23–58.
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Gómez-Zotano, J. & Pardo-Martínez, R. (2019). Aportaciones del análisis pedoantracológico al conocimiento paleoecológico de *Pinus pinaster* en el sur de España: el caso de Sierra Bermeja. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2667>
- Olmedo-Cobo, J.A., Pardo-Martínez, R. & Gómez-Zotano, J. (2021). Primeros datos sobre la composición holocena de los bosques de montaña en el Parque Natural Sierra de las Nieves (Serranía de Ronda) a partir del análisis pedoantracológico. *Boletín de la Asociación Española de Geografía*, 89, 1–46. <https://doi.org/10.21138/bage.3099>
- Pardo-Martínez, R. (2020). La pedoantracología en España: una revisión bibliográfica. *Pirineos*, 175, e059. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2020.175009>
- Rivas-Martínez, S., Penas, A., Díaz, T.E., Cantó, P., del Río, S. et al. (2017). Biogeographic Units of the Iberian Peninsula and Balearic Islands to District Level. A Concise Synopsis. En Loidi, J. (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (pp. 131–138). Springer.
- Rodríguez-Ariza, M.O. & Esquivel, J.A. (2004). Análisis antracológico de la necrópolis de Cruz del Negro, (Carmona, Sevilla). *Revista de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Sevilla*, 13, 113–138. <http://dx.doi.org/10.12795/spal.2004.i13.04>
- Vernet, J.L., Ogereau, P., Figueiral, I., Machado, C. & Uzquiano, P. (2001). *Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents, Sud-Ouest de l'Europe: France, Péninsule ibérique et Îles Canaries*. CNRS.

15. *ABIES PINSAPO* E INCENDIOS FORESTALES: UNA LARGA HISTORIA DE SUPERVIVENCIA A EVENTOS EXTREMOS EN SIERRA BERMEJA (SW BAETIC SYSTEM)

Resumen

El Cambio Global supone una importante amenaza para las formaciones arbóreas y, en particular, para los bosques de montaña, ecosistemas muy sensibles frente a cualquier forma de perturbación y especialmente a los incendios forestales. Un ejemplo son los abetales endémicos de *Abies pinsapo* Boiss, especie clasificada en peligro de extinción, que ocupa actualmente un área de distribución muy reducida y fragmentada en el extremo suroccidental de la Cordillera Bética. Estos bosques relictos constituyen magníficos laboratorios para estudiar los efectos del fuego a lo largo del tiempo. Esta investigación se realizó en Sierra Bermeja, el mayor afloramiento ultramáfico de la Serranía de Ronda. La aplicación de una metodología pedoantracológica en combinación con la cartografía de los incendios forestales recientes nos ha permitido obtener información paleobiogeográfica e histórica inédita que abarca desde el Holoceno hasta la actualidad. Los resultados muestran un declive continuado en el área de distribución del pinsapo como consecuencia, especialmente durante las últimas décadas, de episodios recurrentes de incendios, la principal amenaza para los únicos pinsapares serpentinícolas del planeta. Su supervivencia depende de la aplicación de medidas que garanticen la protección efectiva y la gestión adaptativa de su hábitat en respuesta al Cambio Global.

Palabras clave: carbón; conífera; bosque de montaña; paleoecología; pedoantracología; Serranía de Ronda; España.

Abstract

Global Change poses an important threat for tree formations and in particular for mountain forests, ecosystems that are highly sensitive to any form of disturbance and especially to forest fires. One example is the endemic fir forests of *Abies pinsapo* Boiss., a species classified as in danger of extinction, which currently occupies a very small, fragmented distribution area at the southwestern end of the Baetic Cordillera. These relict forests provide exceptional laboratories for studying the effects of fire over time. This research was performed in Sierra Bermeja, the largest ultramafic outcrop in the Serranía de Ronda. The application of a pedoantracological methodology in combination with cartography of the recent forest fires enabled us to obtain previously unpublished paleo-biogeographical and historical information spanning the Holocene to the present day. The results show a continued decline in the distribution area of the Spanish fir as a consequence, especially during recent decades, of recurring episodes of fire, the main threat to the only serpentine-soil *Abies pinsapo* forests on Earth. Their survival depends on the application of measures that guarantee the effective protection and adaptative management of their habitat in response to Global Change.

Keywords: charcoal; coniferous; orophile forests; palaeoecology; pedoanthracology; Serranía de Ronda; Spain.

15.1. Introducción

A lo largo del Holoceno los paisajes han sufrido importantes transformaciones en un contexto de Cambio Global natural, donde la variabilidad climática, los procesos paleoecológicos y la creciente actividad humana han jugado un papel definitorio en los últimos 15 000 años (Cunill et al., 2012, 2015). Especialmente afectados han sido los bosques de montaña, donde, desde hace milenios el ser humano ha transformado intensamente estos frágiles ecosistemas para aprovechar los recursos disponibles (Walsh et al., 2006; Ejarque et al., 2010).

En el caso de la región mediterránea hay que considerar, además, que el fuego ha sido un factor común y el proceso dominante de perturbación a gran escala que ha afectado a bosques y otras superficies vegetales, por lo que los incendios forestales se diagnostican como elementos importantes de sus paisajes y ecosistemas (Fernandes, 2013; Safford & Ramón-Vallejo, 2019), como demuestran varias investigaciones en distintas regiones mediterráneas (Mouillot et al., 2003; Ajbilou et al., 2006; Gil-Romera et al., 2008; Tinner et al., 2016). Estos bosques de montaña constituyen límites ecológicos o fronteras ambientales de enorme singularidad y vulnerabilidad, en los que es posible detectar con prontitud perturbaciones asociadas a cambios climáticos (Hansen & di Castri, 1992; Kullman, 1998; Kimball & Weihrauch, 2000; Batllori et al., 2009). Por ello se considera que los bosques mediterráneos de coníferas son excelentes laboratorios naturales para el estudio espaciotemporal de perturbaciones de diferente naturaleza, cuyo análisis aporta visiones complementarias que permiten realizar interpretaciones paleoclimáticas y paleoambientales (Cunill et al., 2013; Saltré et al., 2013).

Un ejemplo de este tipo de bosque son los abetales de *Abies pinsapo* Boiss., una de las especies arbóreas más singulares de España y el único abeto estrictamente mediterráneo que crece de forma natural en el Sistema Bético (Linares, 2011). En la actualidad, *A. pinsapo* sólo se encuentra en el Sistema Bético Occidental –endemismo de los sectores biogeográficos Rondeño y Bermejense en la Serranía de Ronda–, y más concretamente en la Sierra de las Nieves y Sierra Bermeja en la provincia de Málaga, y en la Sierra del Pinar y la Sierra del Endrinal en la provincia de Cádiz (Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021). Estos enclaves calizo-peridotíticos de media-alta montaña conservan características ecológicas similares a las existentes durante el último periodo glaciario en el extremo sur de la península Ibérica, lo que les ha permitido convertirse en áreas de refugio biogeográfico para *A. pinsapo*. Esto ha facilitado la supervivencia de esta especie hasta nuestros días, a la vez que ha asegurado su aislamiento genético y evolución independiente de otras especies de abetos europeos y norteafricanos de la cuenca mediterránea (Jaramillo et al., 2010; Alba-Sánchez et al., 2018, 2019).

Dentro de su reducida área de distribución, se encuentra especialmente amenazado en el macizo ultramáfico de Sierra Bermeja, donde la alarmante situación actual de aislamiento de

sus poblaciones por fragmentación de su hábitat compromete la viabilidad y el intercambio genético de los únicos bosques de pinsapos serpentinícolas del planeta (Linares et al., 2009; Linares, 2011; Guzman et al., 2012). Soto (2006) establece que han desaparecido bajo el fuego en las últimas décadas hasta siete rodales de abetal serpentinícola, ocupando en la actualidad una escasa superficie (35 ha).

Sierra Bermeja destaca por el elevado riesgo y la extrema intensidad en cuanto a los incendios forestales se refiere, habiéndose identificado como uno de los más importantes hotspots de la península ibérica (García-Gómez, 1999; Vega-Hidalgo, 1999; Gutiérrez-Hernández et al., 2015). Si bien algunos factores naturales contribuyen a la génesis y propagación del fuego (una densa biomasa altamente combustible, una topografía accidentada con acusadas pendientes y numerosos valles encajados, el azote casi permanente de los fuertes vientos que canaliza el Estrecho de Gibraltar o las elevadas temperaturas que se alcanzan en la época estival), las causas no son sólo de orden natural. Existen importantes implicaciones económicas y sociales en el origen de estos desastres. De acuerdo con García-Gómez (1999) y Gómez-Zotano (2006), la evolución creciente de los incendios forestales refleja con claridad la existencia de conflictos y tensiones de diversos órdenes en Sierra Bermeja: marginalidad social de los pueblos colindantes, precariedad económica de los aprovechamientos, problemas asociados a la titularidad-propiedad de los montes, despoblación de áreas rurales, sobrepresión por turismo rural, abandono de fincas, quemas agrícolas, cambios de uso del suelo, especulación urbanística y recalificaciones de suelos no urbanizables, son hechos que se traducen en la aparición frecuente de incendios, la mayoría de ellos intencionados.

En las últimas décadas, las estadísticas sobre incendios forestales parecen indicar que el fuego en Sierra Bermeja se ha vuelto más frecuente y extenso que en épocas pasadas. En este sentido, son numerosos los estudios que asocian el cambio global y la crisis climática al incremento de este tipo de episodios; por ejemplo, se prevé que el cambio climático aumente las olas de calor y la sequía en todas las regiones climáticas mediterráneas, por lo que la subida de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones incrementará el riesgo de aumento de los incendios forestales/rurales (Bedia et al., 2015; Safford & Ramón-Vallejo, 2019; Morán-Ordoñez et al., 2020; Misir & Misir, 2021; Nunes et al., 2021). Diferentes proyecciones indican que estos efectos climáticos promueven una tendencia positiva en el número de incendios si no se introducen nuevas mejoras en la gestión del fuego (Turco et al., 2014), por lo que la gestión inteligente de este, centrada en la mitigación de su severidad y la resiliencia de los bosques a esta perturbación, es esencial para la sostenibilidad forestal en la región mediterránea (Fernandes, 2013).

Sin embargo, no existen suficientes datos sobre la verdadera extensión que estos incendios pudieron tener sobre los pinsapares de Sierra Bermeja. Para subsanar esta falta de información, en esta propuesta reformulamos que los incendios forestales, principal causa de la desaparición del pinsapo, ofrecen también una gran oportunidad para llevar a cabo una precisa reconstrucción paleobiogeográfica e histórica de los hábitats naturales de esta especie,

conocimiento que podría ser una baza clave en su futura recuperación. Con este objetivo, la base metodológica de la investigación es el análisis paleobiogeográfico de *A. pinsapo* en Sierra Bermeja mediante pedoantracología. Esta técnica consiste en la búsqueda, identificación y datación de los carbones encontrados en suelos naturales (no en yacimientos arqueológicos), que posteriormente son sometidos a análisis estadísticos, paleoecológicos y cartográficos. A su vez, se analizan los principales incendios forestales que han tenido lugar desde la segunda mitad del siglo XX. Para tal fin se han manejado distintas fuentes de información documentales y orales, así como los datos y análisis obtenidos mediante teledetección a partir del tratamiento de imágenes de satélite posteriores a 1975. Ello ha posibilitado, además de la georreferenciación y el cartografiado de aquellas zonas afectadas por los incendios, la determinación de la recurrencia espacial y temporal de los mismos.

La información paleobiogeográfica e histórica obtenida permitirá introducir nuevas medidas para avanzar en la conservación y gestión de *A. pinsapo*, una especie relictiva en peligro de extinción debido al Cambio Global.

15.2. Procedimiento metodológico

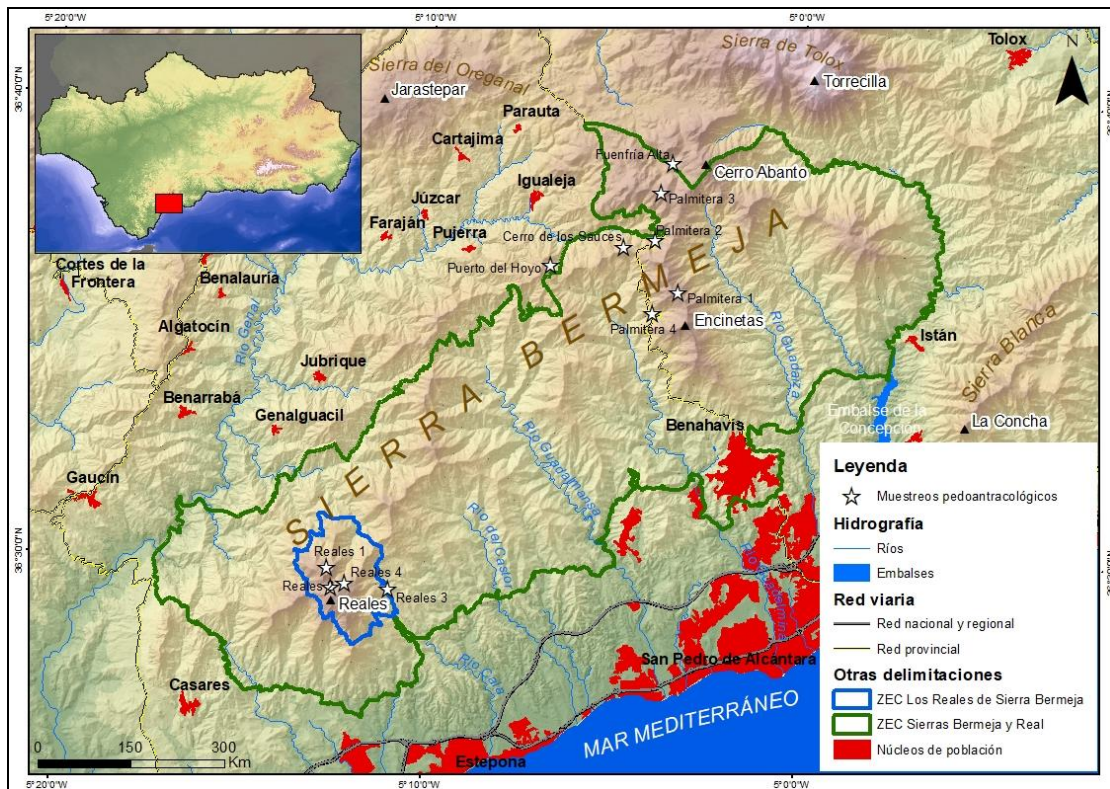
15.2.1. Ámbito de estudio

Sierra Bermeja, localizada en la Serranía de Ronda (SO de la Cordillera Bética), constituye uno de los mayores afloramientos ultramáficos del planeta (300 km²). Paralela a la costa del mar de Alborán, se alza como una montaña de mediana altitud (1508 m s. n. m., Cerro Abanto) (Figura 48).

La componente litológica, con predominio de las peridotitas, condiciona la práctica totalidad de las características abióticas y bióticas –suelos, modelado, ocupación vegetal, fauna–. Esta roca ígnea presenta gran dureza y densidad, y está compuesta por minerales ferromagnésicos denominados genéricamente serpentinas una vez que se alteran por procesos geoquímicos de meteorización (Gómez-Zotano et al., 2014).

Los suelos serpentínicos derivados de las peridotitas, ricos en metales pesados, constituyen un adverso contexto lito-edáfico para la ocupación biológica. Bajo un clima subhúmedo-húmedo mediterráneo –aunque con criptoprecipitación estival derivada de la nubosidad de retención asociada al viento de levante–, se pueden diferenciar tres pisos bioclimáticos: termomediterráneo (hasta los 800 m s. n. m.), mesomediterráneo (800-1300 m s. n. m.) y supramediterráneo (a partir de los 1300 m s. n. m.) (Gómez-Zotano, 2004; Olmedo-Cobo & Gómez-Zotano, 2017), siendo dos los dominios vegetales principales: los bosques edafoxerófilos de *Pinus pinaster* sobre ultramafitas (integrante de la serie de vegetación *Quercococciferae-Pineto acutisquamae*), que son sustituidos en altitud por abetales de *A. pinsapo* (*Bunio macucae-Abieteto pinsapo*), cuyo desarrollo sobre suelos ultramáficos lo convierte en una formación única en el planeta (Gómez-Zotano et al., 2014).

Figura 48. Ámbito de estudio y localización de los muestreos pedoantracológicos efectuados durante el transcurso de la presente investigación.



Fuente: autoría propia a partir de datos de CNIG e IECA.

Aunque las características geológicas de la montaña permiten una clara diferenciación frente a los espacios naturales colindantes, se ha establecido que el ámbito de delimitación para este estudio sea el coincidente con la Zona de Especial Conservación (ZEC) de la Red Natura 2000 “Sierras Bermeja y Real” (ES6170010), y ZEC Los Reales de Sierra Bermeja (ES6170004), con una superficie de 1236 ha y 30 824 ha respectivamente, por corresponder a un territorio cuyos límites están establecidos por la vía administrativa. En la cartografía que se ha generado en este trabajo se indica como ámbito de estudio el perímetro de estas dos ZEC. Adquieren especial relevancia sus sistemas forestales naturales asociados a las peridotitas, asociaciones vegetales que conforman los HIC 9520 (Abetales de *A. pinsapo*) y 9540 (Pinares mediterráneos de pinos mesogeanos endémicos). La protección de estos hábitats, junto con la conectividad ecológica, son las Prioridades de Conservación identificadas en el Plan de Gestión de las ZEC y el motivo de la declaración del Paraje Natural de Los Reales de Sierra Bermeja en 1989. De todos los hábitats forestales destaca el HIC 9520, catalogado en el Plan como muy raro; los pinsapares serpentinícolas son una comunidad vegetal relictiva y única en el mundo (Cabezudo et al., 1989; Pérez-Latorre & Hidalgo-Triana, 2017). Por sus elevados valores naturales ha sido integrada, aunque de forma parcial, en el recién creado Parque Nacional Sierra de las Nieves.

Las singulares características lito-edáficas de Sierra Bermeja también han favorecido un intensivo uso forestal, especialmente centrado en sus extensos pinares resineros, destacando la extracción de madera y resina a lo largo del siglo XIX y primera mitad del siglo XX. De

hecho, esta montaña ha sido considerada como una de las más importantes zonas madereras peninsulares al amparo de La Unión Resinera Española (Uriarte-Ayo, 2000).

Desde mediados del s. XX, estos usos tradicionales del monte se han abandonado, convirtiéndose Sierra Bermeja en el traspais de la urbanizada Costa del Sol Occidental (Gómez-Zotano, 2004). El inicio del turismo coincidió con el declive de los aprovechamientos forestales tradicionales en general y del pino resinero en particular, lo que generó importantes incidencias paisajísticas y territoriales. Ante la falta de precios y mercados para los productos forestales, estos bosques tendieron a ser abandonados, lo que se tradujo en un factor de riesgo ambiental al generarse una excesiva densificación de los vuelos del monte y una abundante acumulación de materia orgánica de fácil combustión que, además, servía como reserva de enfermedades y plagas. Este abandono de las explotaciones, por tanto, repercutió negativamente sobre la frecuencia, extensión e intensidad de los incendios forestales, produciéndose un aumento alarmante de los mismos a partir de la segunda mitad del siglo XX (Gómez-Zotano, 2004, 2006).

15.2.2. Metodología

15.2.2.1. Análisis pedoantracológico

El principal método de investigación utilizado en el presente estudio paleobiogeográfico ha sido el análisis pedoantracológico, y en particular el método adaptado por Cunill (2010) y Cunill et al. (2013). Este consta de las siguientes etapas:

Trabajo de campo. Se han excavado un total de 11 catas (Figura 48), lo que ha permitido cubrir gran parte de la zona montañosa del área de estudio. En cada una de ellas se ha excavado un pozo de muestreo hasta el nivel de la roca madre, del que se han extraído muestras de suelo de entre 3 y 15 kg por nivel de muestreo. Las características geoecológicas de las localidades de muestreo se recogen en la tabla 17.

Análisis antracológico. La segunda etapa de trabajo ha tenido lugar en el laboratorio e incluyó las siguientes fases:

- Las muestras han sido tamizadas en húmedo con tamices de 0.8 mm, 2 mm y 5 mm. Seguidamente, el material recogido por cada uno de los tres tamaños de tamiz se ha dejado secar en un espacio preparado a tal efecto en el laboratorio.
- Los fragmentos de carbón vegetal han sido triados y aislados del conjunto del material tamizado. Por otro lado, se ha descartado la fracción mineral residual; no obstante, y antes de ser descartados, todos los fragmentos de piedra de >5 mm han sido pesados para su posterior inclusión en el cálculo de antracomasa.
- Análisis de la antracomasa. Este análisis compara el peso del carbón vegetal encontrado en el suelo (expresado en mg) con el peso de toda la muestra edáfica (expresado en kg). Este apartado incluye tanto la antracomasa absoluta como la

antracomasa específica de *Abies* sp. para las muestras en las que este taxón ha sido identificado. Para este cálculo, el peso del material mineral atrapado en la malla de 5 mm ha sido restado del peso inicial de la muestra de suelo.

- La identificación taxonómica de los carbones seleccionados se ha realizado con una lupa binocular Nikon SMZ445 y un microscopio óptico de luz reflejada Olympus BX51, cuyo rango de aumentos oscila entre 10 y 400x. Las identificaciones taxonómicas se han apoyado tanto en los diversos atlas de anatomía comparada de la madera disponibles (Schweingruber, 1990; Vernet et al., 2001) como en la colección de fragmentos de madera carbonizada almacenada en la antracoteca del laboratorio Terra Lab UGR del Departamento de Geografía Física de la Universidad de Granada. El número máximo de fragmentos de carbón identificados en cada nivel de muestreo ha variado entre 70 y 1134 fragmentos, habiéndose identificado un total de 3565 carbones.
- Datación por radiocarbono de 28 fragmentos de carbón vegetal de *Abies* sp. en los laboratorios especializados de Poznań (Poznań, Polonia) y Alfred-Wegener-Institut (Bremerhaven, Alemania). Las cronologías obtenidas han sido calibradas con Oxcal v. 4.4 utilizando la base de datos IntCal20 (Reimer et al., 2020), a 2 sigma (95 % de probabilidad).
- Interpretación de los datos antracológicos.

Tabla 17. Características geocológicas de las localidades de muestreo.

Nombre	Coordenadas geográficas	Altitud (m s.n.m.): terrotipo y ombrotipo	Profundidad del muestreo en cm (nº de niveles de muestreo)	Orientación	Litología/tipo de suelo	Ambiente geocológico
Cerro de los Sauces	36°36'49"N; 05°04'50"O	1104: Mesomediterráneo sub-húmedo	54 (3)	N	Peridotita Regosol	Pinar de repoblación en ladera
Fuenfría Alta	36°38'13"N; 05°00'23"O	1217: Mesomediterráneo sub-húmedo	94 (4)	ONE	Gneis Regosol	Pinar de repoblación en ladera
Puerto del Hoyo	36°36'24"N; 05°06'45"O	938: Mesomediterráneo sub-húmedo	137 (8)	SE	Peridotita Leptosol	Pinar en ladera
Palmitera 1	36°35'53"N 05°03'21"O	1364: Meso-Supramediterráneo sub-húmedo	80 (5)	SE	Peridotita Regosol	Matorral en fondo de cuenca endorreica
Palmitera 2	36°36'55"N 05°03'49"O	1202: Mesomediterráneo sub-húmedo	90 (4)	O	Peridotita Leptosol	Pinar en ladera

Palmitera 3	36°37'59"N; 50°03'50"O	1256: Mesomediterráneo sub-húmedo	36 (2)	NO	Peridotita Leptosol	Pinar con abetos en ladera
Palmitera 4	36°35'20"N; 05°03'53"O	838: Mesomediterráneo sub-húmedo	42 (3)	SSO	Peridotita Leptosol	Pinar en ladera
Reales 1	36°29'43"N 05°12'36"O	1165: Mesomediterráneo húmedo	105 (5)	N	Peridotita Leptosol	Abetal-pinar en ladera
Reales 2	36°29'24"N 05°12'08"O	1247: Mesomediterráneo húmedo	52 (4)	NNE	Peridotita Leptosol	Abetal en ladera
Reales 3	36°29'17"N 05°10'56"O	638: Mesomediterráneo húmedo	29 (2)	OSO	Peridotita Leptosol	Matorral con pinos en ladera
Reales 4	36°29'23"N 05°12'05"O	1070: Mesomediterráneo húmedo	86 (3)	SSE	Peridotita Leptosol	Pinar en ladera

Fuente: autoría propia.

15.2.2.2. Análisis geohistórico

Se parte de la consideración de Gran Incendio Forestal (GIF), como aquel que supera las 500 ha. Para el estudio de los GIF que han afectado a Sierra Bermeja, se han consultado distintas fuentes documentales y noticias sobre incendios históricos a partir de la segunda mitad del siglo XX. La cartografía analizada ha permitido definir el ámbito de la montaña de acuerdo con las ZEC Sierras Bermeja y Real, y los Reales de Sierra Bermeja. A continuación, se ha superpuesto toda la información georreferenciada para su análisis, obteniendo, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), una serie de capas vectoriales con las áreas recorridas por el fuego entre los años 1975 y 2021; el uso de la teledetección ha permitido el tratamiento de imágenes de satélite de los respectivos años, disponibles en el repositorio de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Esta información se ha cotejado con la colección de capas vectoriales con datos de incendios forestales (mayores de 10 ha) ocurridos en territorio andaluz entre los años 2008 y 2021, elaboradas por los Centros Operativos Provinciales (REDIAM), con la que hay práctica concordancia. Sin embargo, para el periodo 1975-2008, en los datos generados a partir de teledetección se apreció la ausencia de uno de los GIF más graves ocurridos en la provincia de Málaga, en general, y en Sierra Bermeja en particular, el iniciado el 17 de noviembre de 1975 en Igualeja y que afectó a gran parte del término de Benahavís (Gómez-Zotano, 2004). Según Araque-Jiménez (2013), en este incendio

se calcinaron un total de 10 218 ha, de las cuales 9238 ha eran superficie arbolada correspondiente en su práctica totalidad a pinares serpentinícolas.

De forma particular, para identificar el área recorrida por el fuego en este GIF de 1975, ausente en la base de datos de REDIAM, se han comparado las ortofotos generadas con las imágenes captadas por el sensor MSS del satélite LANDSAT 2 de 1975 y 1976 disponibles en REDIAM (falso color generado con las bandas 4, 5 y 6) para ver la diferencia que hay entre ambas imágenes. En la ortofoto falso color de 1976 (posterior al incendio), aparece una zona diferenciada que podría coincidir con el área incendiada, encuadrada entre los términos de Igualeja, Benahavís y Estepona.

Con el fin de poder precisar mejor el área de esta zona incendiada, se ha generado un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para determinar una posible área de partida e identificar sus límites concretos mediante posterior fotodetección, comparando la imagen del Vuelo Americano Serie B (1956) y la del Vuelo Interministerial de 1977.

El NDVI es el índice más ampliamente utilizado para la determinación de las áreas recorridas por el fuego, aprovechando la información radiométrica de la vegetación que proporcionan las bandas roja e infrarroja cercana, minimizando el efecto de diferentes ángulos solares y efectos del relieve (Rouse et al., 1973; Mather, 1987; Mather & Koch, 2010). Para generar el NDVI se ha procesado la imagen descargada, captada por el sensor multiespectral MSS del satélite LANDSAT 3 el 26 de agosto de 1978.

Tras calcular el NDVI con las bandas de rojo (5) e infrarrojo cercano (7), se ha verificado su concordancia con la posible área afectada resultante de la comparación de las ortoimágenes falso color 1975 y 76. La comparación evidencia que en esa zona el NDVI refleja menos cobertura vegetal, es decir, menos actividad fotosintética, bien porque la zona haya sufrido un incendio o porque sufra más estrés hídrico, lo cual concordaría con el mes de agosto de captura de la imagen.

Para la fotodetección se ha comparado, en la zona en cuestión, la imagen del Vuelo Americano Serie B (1956) y la del Vuelo Interministerial de 1977. El polígono resultante se ha trazado con estas tres fuentes cartográficas generadas: comparativa ortoimágenes falso color años 1975 y 76; NDVI 1978; comparativa por fotodetección de los años 1956 y 1977. Con el polígono generado se ha realizado un mapa topográfico donde se han situado algunos hitos que aparecen como incendiados en la prensa de la época o recogidos por testimonios orales, con el fin de corroborar la concordancia con el área propuesta.

A partir de la ausencia de este GIF de noviembre de 1975, se cotejaron todas las áreas que se indican en la base de datos de REDIAM como áreas recorridas por el fuego entre 1975 y 2021. Ello ha permitido la detección de otro GIF supuestamente ocurrido en 1975 en la zona occidental de Sierra Bermeja, en los términos municipales de Casares y Genalguacil, que no figura en ninguna de las otras fuentes consultadas ni en las noticias de la época. Pese a ello, se ha optado por mantener este incendio junto al resto de incendios históricos que han

afectado a la montaña, a la hora de realizar el análisis de la recurrencia de los incendios en el periodo 1975-2021.

Finalmente se ha procedido al geoprocreso de las capas vectoriales de los incendios que han afectado a Sierra Bermeja en el periodo 1975-2021, generando la cartografía de cada uno de los GIF, así como un mapa que compila las zonas que han sido recorridas por los incendios en más de una ocasión. Todo el procesamiento, análisis de imágenes y generación de la cartografía se ha realizado con los softwares QGIS 2.18.24, ARCGIS 10.3 y GRASS 7.4.1. y versiones posteriores.

15.3. Resultados

15.3.1. Datos paleoecológicos

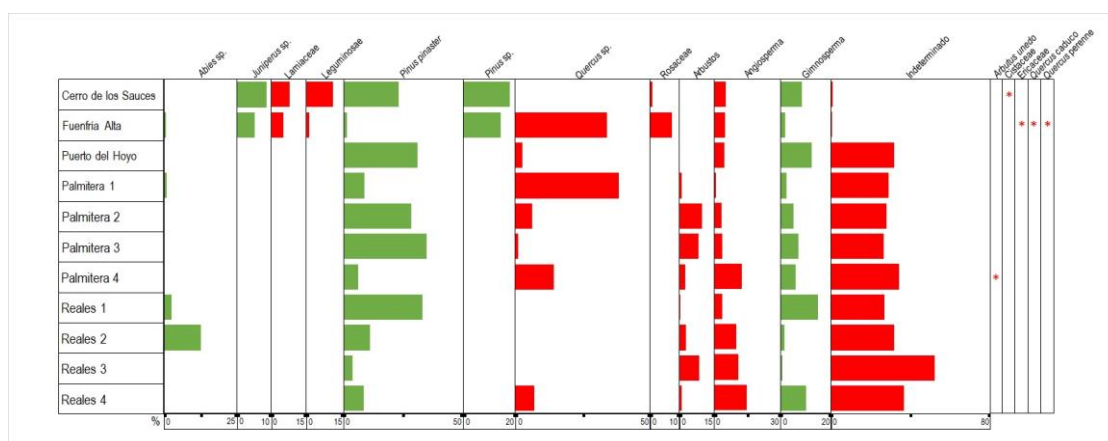
15.3.1.1. Identificaciones taxonómicas y valores de antracomasa

En el transcurso de la investigación se identificaron 3565 fragmentos de carbón, de los que 765 correspondieron a *P. pinaster*, lo que supone el 21.5 % del total (Figura 49). La especie apareció en todos los muestreos efectuados, con unos valores de antracomasa específica que oscilaron entre 14 295.2 mg/kg en el muestreo de Palmitera 1 y 7.3 mg/kg en Palmitera 4.

Tras *P. pinaster*, *Quercus* ha sido el segundo taxón más numeroso con 679 carbonos identificados, estando presente en 7 de los 11 muestreos realizados. Las antracomasas específicas de este género se han situado entre 63 601.5 y 8.4 mg/kg de Palmitera 1 y Reales 4, respectivamente.

Abies ha estado presente en 4 de los 11 muestreos, habiéndose identificado hasta 144 carbonos de este género. Las antracomasas específicas han sido 233.6 mg/kg en Palmitera 1, 37.5 mg/kg en Reales 2, 9.8 mg/kg en Fuenfría Alta y 8.4 mg/kg en Reales 1. Si bien no ha sido posible discriminar el nivel de especie, es muy probable que los fragmentos de abeto hallados pertenezcan a *A. pinsapo* dada su consideración de taxón relicto presente en este territorio desde el Terciario.

Figura 49. Taxones identificados en los distintos muestreos pedológicos.



Fuente: autoría propia.

Junto a estos taxones se han identificado otras categorías y grupos taxonómicos que, en conjunto, han supuesto el 4.1 % de las identificaciones válidas. Es el caso de *Pinus* (1.3 %), *lamiaceae* (0.7 %), *Juniperus* (0.5 %), *leguminosae* (0.5 %), *rosaceae* (0.4 %), *Quercus perenne* (0.3 %), *Quercus caduco* (0.2 %), *Erica* (0.2 %) y *cistaceae* (0.1 %).

Por su parte, el 7.1 % de las muestras identificadas pertenecen al grupo de las angiospermas, mientras que las gimnospermas han significado el 5.5 %. Finalmente, destacar la gran cantidad de muestras indeterminadas, las cuales han supuesto el 34.3 % del total de carbones propuestos para su identificación taxonómica.

15.3.1.2. Dataciones radiocarbónicas

Se han sometido a datación radiocarbónica un total de 28 fragmentos de carbón de *Abies* (Tabla 18). Las muestras datadas proceden de Palmitera 1 (15), Reales 1 (5), Reales 2 (5) y Fuenfría Alta (3), con cronologías que oscilan entre 9931-9616 y 282-82 años cal BP.

Tabla 18. Cronologías obtenidas para los 28 carbones de *Abies* datados radiocarbónicamente.

Muestreo	Código de laboratorio	Edad convencional (C ¹⁴ años BP)	Edad calibrada (años cal BP) (95 %)
Palmitera 1	5173.1.1	8707 ± 37	9931-9616
	5174.1.1	8573 ± 35	9719-9551
	5176.1.1	8549 ± 36	9552
	5175.1.1	8300 ± 40	9266-9206
	5177.1.1	8155 ± 39	9245-9076
	5170.1.1	8003 ± 128	9236-8615
	5171.1.1	8057 ± 111	8672
	Poz-83921	7300 ± 50	8342-8053
	5169.1.1	7142 ± 34	8001-7944
	Poz-78851	6480 ± 40	7516-7356
	5172.1.1	6239 ± 35	7224-7085
	Poz-78852	5710 ± 40	6651-6473
	Poz-83920	5840 ± 40	6607-6573
	Poz-83922	5770 ± 40	6553-6523
	Poz-83924	4605 ± 35	5441-5145
Reales 1	Poz-83919	8860 ± 50	9810
	Poz-83918	6160 ± 40	7014
	Poz-78858	200 ± 30	326-208
	Poz-78859	195 ± 30	325-143
	Poz-78885	60 ± 30	294-102
Reales 2	Poz-82525	3270 ± 30	3516-3476
	Poz-82527	1800 ± 30	1832-1674
	Poz-83914	45 ± 30	295-103
	Poz-83913	40 ± 30	295-103
	Poz-83912	110 ± 30	282-82
Fuenfría Alta	Poz-113780	8740 ± 50	9619
	Poz-113779	4970 ± 35	5897-5668
	Poz-113778	5015 ± 35	5726-5679

Fuente: autoría propia.

15.3.2. Información histórica

Desde 1950 se han identificado 31 incendios forestales dentro del ámbito de estudio, de los cuales 15 fueron GIF (Tabla 19), lo que supone un promedio de un gran incendio forestal cada 4.99 años. La superficie total afectada suma 46 227 ha, de las cuales 1916 ha corresponden a incendios menores de 500 ha, y 44 311 ha a GIF. De acuerdo con el concepto generación de incendios, que relaciona el comportamiento de fuego con la estructura del paisaje, tres de ellos se pueden considerar de sexta generación. La gran mayoría de los incendios son de origen antrópico, lo que concuerda con la estadística general a nivel de Andalucía y España señalada por las distintas administraciones (Magrama, 2012).

Tabla 19. Incendios forestales y pinsapos afectados en Sierra Bermeja durante el periodo 1950-2021.

Fecha	Hectáreas	GIF	Generación	Origen	Número de pinsapos afectados
24-8-1956	20			Antrópico	500
4-8-1966	5000	SI		Antrópico	429
20-4-1969	N/A			N/A	-
19-7-1969	1500	SI		Antrópico	Desconocido
1-7-1971	N/C			N/A	?
3-8-1971	1200	SI		Antrópico	-
29-8-1971	400			N/A	-
30-8-1974	2500	SI		Antrópico	-
1975	866	SI		N/A	?
17-11-1975	9247	SI	6ª	Antrópico	-
1976	258			N/A	-
25-7-1980	<500			N/A	-
3-3-1987	33			N/A	-
11-10-1990	112			N/A	-
21-5-1991	921	SI		Antrópico	-
7-8-1991	8157	SI	6ª	Antrópico	565
10-8-1991	178			N/A	-
28-8-1992	545	SI		Antrópico	-
16-7-1995	2319	SI		Antrópico	-
4-9-1995	470	SI		Antrópico	-
12-9-1995	101			N/A	-
4-7-1999	524	SI		Antrópico	-
18-6-2000	179			N/A	-
2-1-2004	5			N/A	-
8-8-2004	86			N/C	-
9-9-2009	533	SI		Antrópico	-
4-2-2012	798	SI		Antrópico	-
20-8-2017	32			N/A	-
19-12-2017	12			Natural?	-
9-8-2021	?			Antrópico	-
8-9-2021	9731	SI	6ª	Antrópico	3000 (aprox.)
TOTAL	46 227	-	-	-	4494

Fuente: autoría propia.

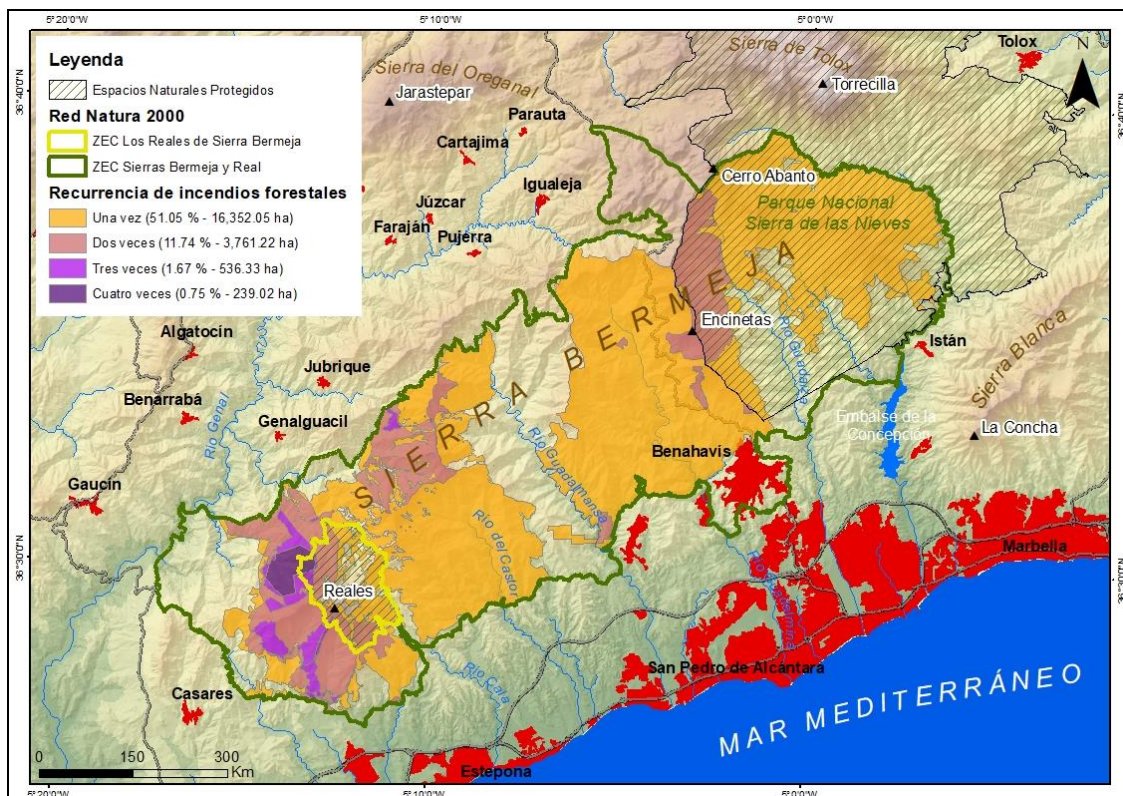
El total del área incendiada, según el periodo analizado, supera la del ámbito de estudio, siendo la superficie quemada en dos o tres ocasiones bastante elevada (Tabla 20). Tras realizar el geoproceto de todos los incendios históricos desde 1975 (mayores de 500 ha –GIF– y menores) para identificar qué áreas han sido recorridas por el fuego más de una vez, se deduce en el mapa de la figura 50 que la parte más afectada de Sierra Bermeja es su mitad occidental, en torno a la Zona de Especial Conservación de Los Reales de Sierra Bermeja, donde se encuentra el pinsapar de Los Reales, rozando las 240 ha que han sido recorridas por el fuego hasta en cuatro ocasiones (1975, 1976, 1995 y 2021). El resto del ámbito concentra los GIF de mayor extensión (1975, 1991 y 2021).

Tabla 20. Superficie quemada y recurrencia del fuego en Sierra Bermeja.

	Hectáreas	%
Área de estudio	32 269.72	100 %
Área total quemada	20 888.62	65.21 %
Área incendiada una vez	16 352.05	51.05 %
Área incendiada dos veces	3761.22	11.74 %
Área incendiada tres veces	536.33	1.6 7%
Área incendiada cuatro veces	239.02	0.75 %

Fuente: autoría propia.

Figura 50. Identificación de las áreas recorridas por el fuego en una o más ocasiones desde 1975 hasta 2021.



Fuente: autoría propia a partir de datos de CNIG, IECA y REDIAM.

Los pinsapares serpentinícolas han sido alcanzados por cinco incendios forestales (1956, 1966, 1969, 1991 y 2021), suponiendo una pérdida total de 4494 árboles. De todos los

incendios forestales, el más reciente ha sido el que ha afectado a un mayor número de pinsapos según las estimaciones realizadas por la Plataforma Sierra Bermeja Parque Nacional, a falta de datos oficiales.

15.4. Discusión

Los incendios forestales en Sierra Bermeja constituyen, desde el Holoceno, uno de los principales factores limitantes para la supervivencia de *A. pinsapo*, ya que asocia magnitudes de grandes proporciones sobre las que subyacen tanto una casuística estructural e inmediata, compleja y diversa, como importantes diferencias internas en cuanto a su distribución espacial.

El análisis pedoantracológico llevado a cabo en el ámbito ha constatado la existencia de hasta 28 incendios en el seno del pinsapar peridotítico de Sierra Bermeja durante los últimos 10 000 años, demostrando que el fuego forestal es un fenómeno antiguo en dicho conjunto fisiográfico, coincidiendo con lo apuntado por otros autores para el ámbito mediterráneo (Naveh, 1974; Trabaud, 1981; Pons & Thinon, 1987). Buena prueba de ello son los valores de antracomasa detectados, especialmente cuando se han contextualizado con los hallados en otras localidades próximas al ámbito de estudio. Destaca la elevada concentración de madera carbonizada en Palmitera 1, con una cifra de antracomasa que se sitúa en 137 379.3 mg/kg, valor que no encuentra parangón en estudio pedoantracológico alguno (Olmedo-Cobo et al., 2017; Pardo-Martínez, 2020). Asimismo, otras localizaciones del macizo bermejense también han revelado valores de antracomasa muy destacados, caso de Palmitera 3 (7831.6 mg/kg), Palmitera 2 (7066.3 mg/kg), Reales 2 (2115.2 mg/kg) y Reales 1 (1965 mg/kg), cifras muy superiores a las calculadas en otros enclaves de la Serranía de Ronda (ver Olmedo-Cobo et al., 2021; Pardo-Martínez et al., 2021).

Esta dilatada historia de afectación del fuego al pinsapo pudo ser la responsable de su extinción local en aquellas paleolocalidades halladas. A pesar de que buena parte de los carbones de gimnospermas identificados en el ámbito de estudio pertenezcan a *P. pinaster*, se han podido identificar varios fragmentos pertenecientes a *A. pinsapo* en lugares en los que este taxón está actualmente ausente, caso de Palmitera 1 y Fuenfría Alta. Ello permitiría confirmar la existencia en el pasado de un área de distribución del pinsapo más extensa que la actual en el marco de Sierra Bermeja, así como en el extremo occidental de la Cordillera Bética (Pardo-Martínez et al., 2021). Este supuesto, apoyado por la presencia de registros fósiles de abetos circunmediterráneos, ya había sido señalado por Gómez-Zotano (2004, 2006) y Linares (2011). Asimismo, Alba-Sánchez et al. (2013, 2018) detectaron registros holocenos de polen de *Abies* superiores al 3-5 % en determinadas localizaciones del sur y sureste peninsular, parámetro que confirmaría que no se trata de poblaciones alóctonas. Dichas evidencias paleoecológicas también son concordantes con las aportaciones que emanan de los principales Modelos de Distribución de Especies (MDE) aplicados a *A. pinsapo* (Navarro-Cerrillo et al., 2006a; Alba-Sánchez et al., 2010; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; Gutiérrez-Hernández, 2018), y en

última instancia avalarían la mayor extensión del pinsapar ofrecida por la base de datos Euforgen (2022).

Las dataciones obtenidas para 28 fragmentos de *Abies*, junto a las disponibles para otros taxones arbóreos en el conjunto de la Serranía de Ronda (ver Olmedo-Cobo et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2019ab; Olmedo-Cobo et al., 2021; Pardo-Martínez et al., 2021) permiten teorizar acerca de cómo pudo ser la dinámica local de *A. pinsapo* tras el Último Máximo Glacial. Hasta 5 cronologías fechadas entre 9931-9616 y 9552 años cal BP. constatarían la existencia de varios episodios de fuego durante las primeras fases del Holoceno. Dichas perturbaciones coinciden con el máximo térmico y seco ocurrido hace 9500 años en el entorno del mar de Alborán (Jalut et al., 2000; Cacho et al., 2001), lo que permitiría atribuir el retraimiento del pinsapar durante esta etapa a factores eminentemente naturales. Esta circunstancia pudo ser aprovechada por *P. pinaster*, especie que en el sur peninsular ha estado presente desde el Pleistoceno (Costa, 2005; Olmedo-Cobo et al., 2019ab) –siendo el taxón más numeroso del registro pedoantracológico– para ocupar numerosos nichos ecológicos, entre ellos los cedidos por el pinsapo. Previsiblemente los incendios se intensificarían hace 6000 años, coincidiendo con el comienzo del clima típicamente mediterráneo (Mauri et al., 2015), etapa contemporánea al constatado incremento del poblamiento prehistórico en la zona litoral del piedemonte de Sierra Bermeja durante el Neolítico y Calcolítico, tal y como recogen Ferrando de la Lama (1988) y Fernández et al. (2007). Esta dinámica, enmarcada en una profunda fase de transformación del paisaje vegetal dominante en el sur peninsular (Carrión et al., 2008), favorecería a aquellas coníferas mejor adaptadas a condiciones más secas, como sucede con los pinares de *P. pinaster*. La ausencia de carbón de *Abies* con cronologías posteriores a 5000 años, unido al progresivo descenso de polen de *Abies* en la mayoría de registros fósiles del sur peninsular (Carrión, 2013), ayudarían a respaldar esta teoría. Cabe la posibilidad, por tanto, de que el pinsapo desapareciera tanto en Palmitera 1 como en Fuenfría Alta durante el Holoceno medio, momento en el que la intensificación de las perturbaciones, tanto de origen natural como antrópico, habrían provocado la desaparición del abetal en sendos claves, si bien resulta necesario seguir profundizando en la paleoecología del macizo para validar esta hipótesis.

En cualquier caso, la identificación de carbón de *Abies* en Palmitera 1 y Fuenfría Alta confirmaría el papel de Sierra Bermeja como refugio glacial durante los constantes vaivenes climáticos relacionados con los avances de las glaciaciones, que provocaron la reducción y fragmentación de los rangos de distribución de aquellas especies mejor adaptadas a climas templados (Van der Veken et al., 2007; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013). Asimismo, ambas localizaciones –Palmitera 1 y Fuenfría Alta– pudieron haber posibilitado la conexión del pinsapar de la Sierra de las Nieves con el reducto de pinsapo más meridional del sur peninsular: el pinsapar serpentinícola de Sierra Bermeja. Por su parte, la Sierra del Oreganal constituiría el nexo de unión entre los pinsapares del Parque Natural de la Sierra de Grazalema y del Parque Nacional de la Sierra de las Nieves (Pardo-Martínez et al., 2021). Junto a ello, la presencia milenaria de *P. pinaster* ha permitido resolver, en buena medida, la enquistada controversia dinámica y sucesional-ecológica entre latifolias-coníferas como vegetación

potencial sobre sustratos ultramáficos bajo clima mediterráneo que existía hasta hace relativamente poco tiempo (Gómez-Zotano et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2019ab). En conjunto, esta información pone de manifiesto que las coníferas *P. pinaster* y *A. pinsapo* han constituido la vegetación climácica durante los últimos 10 000 años sobre los suelos serpentínicos de Sierra Bermeja.

La información paleoecológica obtenida demuestra, una vez más, el potencial de la pedoantracología como recurso para conocer la composición y dinámica ecológica de la vegetación leñosa incendiada durante los últimos milenios (Nelle et al., 2013). Paralelamente, desde hace años se ha convertido en una disciplina de gran utilidad para el conocimiento geohistórico de los incendios forestales, especialmente cuando se combina con otras fuentes de carácter paleoecológico (Carracedo-Martín et al., 2017), si bien presenta una destacada ventaja frente al resto de aproximaciones: su alta resolución espacial (Talon et al., 1998; Cunill et al., 2012, 2015). Por tanto, los esfuerzos de restauración y regeneración del pinsapar, que hasta el momento se han basado en fuentes históricas, estudios de hábitats actuales y MDE, muchos de los cuales han contenido imprecisiones e incertidumbres, pasan por considerar las aportaciones derivadas de estos estudios paleoecológicos.

Por su parte, los datos históricos y cartográficos de los últimos 71 años muestran una recurrencia muy elevada de GIF; 15 de los 31 incendios identificados en Sierra Bermeja superaron las 500 ha, hecho que puede apuntar la tendencia a convertirse en GIF en los incendios que tienen lugar en esta montaña, donde se ha producido un incendio forestal de consideración cada 4.99 años durante el periodo 1956-2021. Se trata de eventos extremos que en distintas ocasiones han afectado a los pinsapares con consecuencias dramáticas para esta especie en peligro de extinción. El último de los GIF, ocurrido en septiembre de 2021, ha supuesto una catástrofe histórica, habiendo sido calcinadas más de 9700 ha.

La dinámica incendiaria iniciada en los años sesenta del siglo XX responde a una compleja conflictividad socioterritorial derivada de las tensiones generadas en el turístico litoral de la Costa del Sol y en el agrícola valle del Genal (Gómez Zotano, 2006; Martos-Martín & Gómez-Zotano, 2021). El último de los incendios forestales ocurridos en Sierra Bermeja (septiembre de 2021) ha afectado a más de 9 700 hectáreas, de las cuales prácticamente la mitad era superficie arbolada –pinar y abetal–, de la ZEC Sierras Bermeja y Real, la ZEC Los Reales de Sierra Bermeja, la ZEC Valle del Genal, la ZEC río del Castor y la ZEC río del Padrón. Ha significado la mayor pérdida conocida para *A. pinsapo* como consecuencia del fuego, con más de 3000 ejemplares calcinados, algunos de ellos de más de 200 años de edad. Esta importante reducción del dosel arbóreo ha provocado que, tras las últimas lluvias torrenciales, se hayan perdido más de 20 toneladas por hectárea de suelo, circunstancia que previsiblemente redundará de forma negativa en la regeneración de la cubierta vegetal. Las autoridades competentes se han mostrado incapaces de afrontar este devastador evento extremo, amparándose en que se trata de un incendio de sexta generación sin precedentes en la zona,

pero como se ha podido comprobar en esta investigación, no es la primera vez que ocurre un incendio de estas características en Sierra Bermeja.

Por otra parte, atendiendo a los datos, los fuegos continuados han jugado un papel esencial en el mantenimiento del pinar y, más concretamente, en la creación de una estructura de diferentes clases de edad, aunque ésta afirmación hay que tomarla con mucha precaución. Debe considerarse que *P. pinaster*, al contrario de lo que sucede con *A. pinsapo*, es de las coníferas españolas la más pirofítica, debido quizás a su alto contenido en resina (Ruiz de la Torre, 1993), lo que explica la generación de fuegos de alta intensidad. La subespecie bermejense, *P. pinaster* subsp. *Acutisquama*, ha demostrado, además, ser la más resistente al fuego de las existentes en la península, capaz de resistir varios fuegos repetidos a intervalos de años relativamente cortos (Vega et al., 2011). Por esta razón, se hace necesario el estudio de estos fenómenos en Sierra Bermeja, donde gran parte de la vegetación está constituida por bosques de pinos resineros autóctonos.

Dada la significación del fuego en Sierra Bermeja a lo largo del tiempo, así como la mayor frecuencia e intensidad de este en el macizo durante las últimas décadas, se requiere de una mayor atención por parte de los agentes implicados en la gestión de sus bosques, de ahí la importancia de incluir este macizo en su totalidad en la Red de Parques Nacionales de España como mejor representante de los ecosistemas serpentínicos del país. Este hecho adquiere mayor trascendencia a partir del último informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2022), donde se advierte que los incendios forestales extremos aumentarán un 14 % para 2030, un 30 % para 2050 y un 50 % para fin de siglo debido a la crisis climática.

15.5. Conclusiones

La información derivada del estudio pedoantracológico ha permitido obtener información inédita de gran interés paleoecológico sobre la dinámica holocena de ciertos bosques de montaña, como los pinsapares de *A. pinsapo*. Asimismo, los datos obtenidos han constatado cómo el fuego habría desempeñado un papel muy importante en la configuración del paisaje vegetal de Sierra Bermeja tras el Último Máximo Glacial. En última instancia, el fuego podría haber sido el responsable de la extinción local del pinsapo en ciertos enclaves de Sierra Bermeja, tal y como se infiere de la identificación de carbón del género *Abies* en localidades en las que este taxón no está presente en la actualidad, caso de Palmitera 1 y Fuenfría Alta.

Paralelamente, la información analizada a partir del manejo de distintas fuentes documentales y orales, así como los datos obtenidos mediante teledetección, advierten de una preocupante dinámica incendiaria durante los últimos 66 años. Multitud de factores de muy distinta naturaleza, como la grave crisis que envuelve al medio rural desde hace décadas, la emergencia del modelo turístico dominante en la Costa del Sol o la escasa atención por parte de los agentes implicados en la gestión de la cubierta vegetal de Sierra Bermeja, han

convertido a este singular macizo montañoso en un *hotspot* incendiario de primer orden a nivel regional.

La demostrada significación de los incendios a lo largo de la prehistoria en Sierra Bermeja, unida a su mayor frecuencia e intensificación durante las últimas décadas, advierte de la necesidad de incluir a este macizo en la Red de Parques Nacionales de España. Todo ello en aras de garantizar la protección efectiva del ecosistema serpentínico más importante a nivel nacional, con especial atención al exclusivo pinsapar peridotítico de Sierra Bermeja, favoreciendo la gestión adaptativa de este amenazado hábitat frente al Cambio Global.

Referencias

- Ajbilou, R., Marañón, T. & Arroyo, J. (2006). Ecological and biogeographical analyses of Mediterranean forests of northern Morocco. *Acta Oecologica*, 29(1), 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2005.08.006>
- Alba-Sánchez, F. & López-Sáez, J.A. (2013). Paleobiogeografía del pinsapo en la Península Ibérica durante el Cuaternario. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 33–52). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Benito, B., Linares, J.C., Nieto-Lugilde, D. & López-Merino, L. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: a phytogeographic approach using fossil pollen data and species distribution models. *Diversity and Distributions*, 16(2), 214–228. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00636.x>
- Alba-Sánchez, F., Abel-Schaad, D., López-Sáez, J.A., Sabariego Ruiz, S., Pérez-Díaz, S. & González-Hernández, A. (2018). Paleobiogeografía de *Abies* spp. y *Cedrus atlantica* en el Mediterráneo occidental (península ibérica y Marruecos). *Ecosistemas*, 27(1), 26–37. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1441>
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Abel-Schaad, D., Sabariego, S., Pérez-Díaz, S. et al. (2019). The impact of climate and land-use changes on the most southerly fir forests (*Abies pinsapo*) in Europe. *The Holocene*, 29(7), 1176–1188. <https://doi.org/10.1177/0959683619838>
- Araque-Jiménez, E. (2013). Medio siglo de grandes incendios forestales en Andalucía (1961-2011). *Méditerranée: Revue géographique des pays méditerranéens*, 121, 41–52. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.6840>
- Batlloori, E., Blanco-Moreno, J.M., Ninot, J.M., Gutiérrez, E. & Carrillo, E. (2009). Vegetation patterns at the alpine treeline ecotone: The influence of tree cover on abrupt change in species composition of alpine communities. *Journal of Vegetation Science*, 20(5), 814–825. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01085.x>

- Bedia, J., Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Benali, A., Brands, S. et al. (2015). Global patterns in the sensitivity of burned area to fire-weather: Implications for climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214-215, 369–379. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.002>
- Cabezudo, B., Nieto-Caldera, J.M. & Pérez-Latorre, A. (1989). Contribución al conocimiento edafófilo-serpentinícola del Sector Rondeño (Málaga, España). *Acta Botánica Malacitana*, 14, 291–294. <https://doi.org/10.24310/abm.v14i.9397>
- Cacho, I., Grimalt, J., Canals, M., Sbaiffi, L., Shackleton, N.J. et al. (2001). Variability of the western Mediterranean Sea surface temperature during the last 25,000 years and its connection with the Northern Hemisphere climatic changes. *Paleoceanography*, 16, 40–52. <https://doi.org/10.1029/2000PA000502>
- Carracedo-Martín, V., Cunill-Artigas, R., García-Codrón, J.C., Pèlachs-Mañosa, A., Pérez-Obiol, R. & Soriano-López, J.M. (2017). Fuentes para la geografía histórica de los incendios forestales. Algunas consideraciones metodológicas. *Cuadernos Geográficos*, 56(3), 66–89.
- Carrión, J.S. (2013). *Paleoflora y Paleovegetación de la Península Ibérica e Islas Baleares: Plioceno-Cuaternario*. Ministerio de Economía y Competitividad, Universidad de Murcia y Fundación Séneca.
- Carrión, J.S., Finlayson, C., Fernández, S., Finlayson, G., Allué, E. et al. (2008). A coastal reservoir of biodiversity for Upper Pleistocene human populations: Palaeoecological investigations in Gorham's Cave (Gibraltar) in the context of the Iberian Peninsula. *Quaternary Sciences Reviews*, 27(23-24), 2118–2135. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.016>
- Costa, M., Morla, C. & Sainz, H. (2005). *Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica*. Editorial Planeta.
- Cunill, R. (2010). *Estudi interdisciplinari de l'evolució del límit superior del bosc durant el període holocènic a la zona de Plaús de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català* (Tesis Doctoral). Universidad Autònoma de Barcelona.
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A. & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(4–5), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00334-011-0342-y>
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A., Rodríguez, J.M. et al. (2013). Holocene high-altitude vegetation dynamics in the Pyrenees: a pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach. *Quaternary International*, 289, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.04.041>
- Cunill, R., Métailié, J. & Galop, D. (2015). Palaeoecological study of Pyrenean lowland fir forests: Exploring mid-late Holocene history of *Abies alba* in Montbrun (Ariège, France). *Quaternary International*, 366, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.12.050>

- Ejarque, A., Miras, Y., Riera, S., Palet, J.M. & Orengo, H.A. (2010). Testing micro-regional variability in the Holocene shaping of high mountain cultural landscapes: a palaeoenvironmental case-study in the eastern Pyrenees. *Journal of Archaeological Science*, 37(7), 1468–1479. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.007>
- Euforgen (2022). European forest genetic resources programme. Recuperado de <https://www.euforgen.org/>
- Fernández, P. (2013). Fire-smart management of forest landscapes in the Mediterranean basin under global change. *Landscape and Urban Planning*, 110, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.10.014>
- Fernández, L.E., Suárez, J., Tomassetti, J.M. & Navarro, I. (2007). Corominas, una necrópolis megalítica en el ámbito litoral malagueño. *Mainake*, 29, 513–540.
- Ferrando de la Lama, M. (1988). La cueva de Gran Duque (Casares, Málaga). *Mainake*, 8-9, 105–127.
- García-Gómez, A. (1999). *Política forestal e incendios: una aproximación desde distintas escalas. La incidencia territorial en Andalucía* (Tesis Doctoral). Universidad de Sevilla.
- Gil-Romera, G., García, M. & Calleja, J.A. (2008). The late Holocene palaeoecological sequence of Serranía de las Villuercas (southern Meseta, western Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*, 17, 653–666. <https://doi.org/10.1007/s00334-008-0146-x>
- Gómez-Zotano (2004). *El papel de los espacios montañosos como traspaís del litoral mediterráneo andaluz, el caso de Sierra Bermeja (provincia de Málaga)* (Tesis Doctoral). Universidad de Granada.
- Gómez-Zotano, J. (2006). *Naturaleza y paisaje en la Costa del Sol Occidental*. Servicio de Publicaciones Centro de Ediciones de la Diputación de Málaga.
- Gómez-Zotano, J., Román-Requena, F., Hidalgo-Triana, N. & Pérez-Latorre, A.V. (2014). Biodiversidad y valores de conservación de los ecosistemas serpentínicos en España: Sierra Bermeja (provincia de Málaga). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 65, 187–206. <https://doi.org/10.21138/bage.1749>
- Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal*. Editorial La Serranía.
- Gutiérrez-Hernández, O. (2018). Impacto del calentamiento global en la distribución y supervivencia del pinsapo (Serranía de Ronda). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 76, 504–549. <https://doi.org/10.21138/bage.2532>
- Gutiérrez-Hernández, O., Senciales-González, J.M. & García, L.V. (2015). Los incendios forestales en Andalucía: investigación exploratoria y modelos explicativos. *Flamma*, 6(3), 144–148.

- Guzmán, J.R., Catalina, M.A., Navarro-Cerrillo, R.F., López-Quintanilla, J. & Sánchez, R. (2013). Los paisajes del pinsapo a través del tiempo. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 111–158). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Hansen, A.J. & Di Castri, F. (1992). *Landscape boundaries. Consequences for biotic diversity and ecological flows*. Springer-Verlag.
- Jalut, G., Esteban, A., Bonnet, L., Gauquelin, T. & Fontugne, M. (2000). Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(3-4), 255–290. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00075-4)
- Jaramillo, J.P., Grivet, D. & Terrab, A. (2010). The Strait of Gibraltar as a major biogeographic barrier in Mediterranean conifers: A comparative phylogeographic survey. *Molecular Ecology*, 19(24), 5452–5468. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04912.x>
- Kimball, K. & Weihrauch, D. (2000). Alpine Vegetation Communities and the Alpine-Treeline Ecotone Boundary in New England as Biomonitors for Climate Change. En McCool, S., Cole, D., Borrie, W. & Loughlin, J. (Eds.), *Wilderness science in a time of change conference* (pp. 93–101). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Kullman, L. (1998). Palaeoecological, biogeographical and palaeoclimatological implications of early Holocene immigration of *Larix sibirica* into the Scandes Mountains, Sweden. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 7(3), 181–188. <https://doi.org/10.2307/2997373>
- Linares, J.C. (2011). Biogeography and evolution of *Abies* (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: the roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 38(4), 619–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02458.x>
- Linares, J.C., Camarero, J.J. & Carreira, J.A. (2009). Interacting effects of changes in climate and forest cover on mortality and growth of the southernmost European fir forests. *Global Ecology and Biogeography*, 18(4), 485–497. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00465.x>
- Martos-Martín, J. & Gómez-Zotano, J. (2021). Sierra Bermeja y los grandes incendios forestales. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp. 391–437). Editorial La Serranía.
- Mather, P.M. & Koch, M. (2010). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*. John Wiley & Sons.
- Mauri, A., Davis, A.S., Kaplan, O. & Collins, P. (2015). The climate of Europe during the Holocene: a gridded pollen-based reconstruction and its multi-proxy evaluation. *Quaternary Science Reviews*, 112, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.013>

- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2022). Estadísticas de incendios forestales. Recuperado de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/Incendios_default.aspx
- Misir, M. & Misir, N. (2021). Evaluation of forest fires in terms of Climate Change. En Kavzaoğlu, T. (Ed.), *Forest Fires Causes, Effects, Monitoring, Precautions and Rehabilitation Activities* (pp. 63–87). TÜBA.
- Morán-Ordóñez, A., Ameztegui, A., De Cáceces, M., De-Miguel, S., Lefrève, F. et al. (2020). Future trade-offs and synergies among ecosystem services in Mediterranean forests under global change scenarios. *Ecosystem Services*, *45*, 101174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101174>
- Mouillot, F., Ratte, J.P., Joffre, R., Moreno, J.M. & Rambal, S. (2003). Some determinants of the spatio-temporal fire cycle in a Mediterranean landscape (Corsica, France). *Landscape Ecology*, *18*, 665–674. <https://doi.org/10.1023/B:LAND.0000004182.22525.a9>
- Navarro-Cerrillo, R.M., Fernández, L., Blanco-Oyonarte, P., Calzado, C., López-Quintanilla, J. et al. (2006). Physiography potentiality of Spanish fir forests (*Abies pinsapo* Boiss.) in Andalucía. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, *15*, 137–152. <https://doi.org/10.5424/srf/200615S1-00988>
- Naveh, Z. (1974). Effects of fire in the Mediterranean Region. En Kozlowski, T.T. (Ed.), *Fire in Ecosystems* (pp. 401–434). Academic Press.
- Nelle, O., Talon, B. & Robin, B. (2013). Pedoanthracology: Analysing soil charcoal to study Holocene palaeoenvironments. *Quaternary International*, *289*, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.024>
- Nunes, L., Meireles, C., Pinto-Gomes, C. & Almeida-Ribeiro, N. (2022). The Impact of Climate Change on Forest Development: A Sustainable Approach to Management Models Applied to Mediterranean-Type Climate Regions. *Plants*, *11*(1), 69. <https://doi.org/10.3390/plants11010069>
- Olmedo-Cobo, J.A. & Gómez-Zotano, J. (2017). Los climas de la Serranía de Ronda: una propuesta de clasificación. *Takurunna*, *6-7*, 23–58.
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2017). Paleoecología de *Abies* sp. en Sierra Bermeja (sur de la península ibérica) durante el Holoceno medio a partir del análisis pedoantracológico. *Bosque*, *38*(2), 259–270. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200004>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Gómez-Zotano, J. & Pardo-Martínez, R. (2019a). Aportaciones del análisis pedoantracológico al conocimiento paleoecológico de *Pinus pinaster* en el sur de España: el caso de Sierra Bermeja. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, *80*, 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2667>

- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Gómez-Zotano, J. (2019b). The native status of *Pinus pinaster* on serpentine soils: charcoal analysis and palaeoenvironmental history in Sierra Bermeja (southern Iberian Peninsula, Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*, 28, 417–432. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0701-z>
- Olmedo-Cobo, J.A., Pardo-Martínez, R. & Gómez-Zotano, J. (2021). First data about the Holocene composition of mountain forests in the Sierra de las Nieves Natural Park (Ronda Mountains, Spain) through pedoanthracological analysis. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 89. <https://doi.org/10.21138/bage.3099>
- Pardo-Martínez, R. (2020). La pedoantracología en España: una revisión bibliográfica. *Pirineos*, 175, e059. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2020.175009>
- Pardo-Martínez, R., Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). The history of *Abies pinsapo* during the Holocene in southern Spain, based on pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 31, 307–321. <https://doi.org/10.1007/s00334-021-00855-w>
- Pérez-Latorre, A. & Hidalgo-Triana, N. (2017). Los serpentinófilos suribéricos. Las joyas botánicas de Sierra Bermeja. *Takurunna*, 6-7, 107–120.
- Pons, A. & Thinon, M. (1987). The role of fire from paleoecological data. *Ecologie Mediterrane*, 13, 3–11.
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G. et al. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1973). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation green wave effect of natural vegetation*. Texas A&M University.
- Ruíz de la Torre, J. (1993). *Mapa Forestal de España*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Safford, H.D. & Ramón-Vallejo, V. (2019). Ecosystem management and ecological restoration in the Anthropocene: integrating global change, soils, and disturbance in boreal and Mediterranean forests. *Developments in Soil Science*, 36, 259–308. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63998-1.00012-4>
- Saltré, F., Saint-Amant, R., Gritti, E.S., Brewer, S., Gaucherel, C. et al. (2013). Climate or migration: what limited European beech post-glacial colonization? *Global Ecology and Biogeography*, 22(11), 1217–1227. <https://doi.org/10.1111/geb.12085>
- Schweingruber, F.H. (1990). *Microscopic wood anatomy: structural variability of stems and twigs in recent and subfossil woods from Central Europe*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.

- Soto, D. (2006). Núcleos residuales de pinsapo perdidos en Andalucía en el siglo XX. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 79–86.
- Talon, B., Carcaillet, C. & Thion, M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Geographie Physique et Quaternaire*, 52(2), 195–208. <https://doi.org/10.7202/004875ar>
- Tinner, W., Vescovi, E., van Leeuwen, J.F.N., Colombaroli, D., Henne, P.D. et al. (2016). Holocene vegetation and fire history of the mountains of Northern Sicily (Italy). *Vegetation History and Archaeobotany*, 25, 499–519. <https://doi.org/10.1007/s00334-016-0569-8>
- Trabaud, L. (1982). Effects of Past and Present Fire on the Vegetation of the French Mediterranean Region. En Conrad, C., Oechel, E. & Walter, C. (Eds.), *Dynamics and Management of Mediterranean-Type Ecosystems. Proceeding Symposium* (pp. 450–457). United States Department of Agriculture - Forest Service.
- Turco, M., Llasat, M.C., von Hardenberg, J. & Provenzale, A. (2014). Climate change impacts on wildfires in a Mediterranean environment. *Climatic Change*, 125, 369–380. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1183-3>
- United Nations Environment Programme (2022). *Spreading like Wildfire – The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires*. United Nations Environment Programme.
- Uriarte-Ayo, R. (2000). *La Unión Resinera Española (1936-1986)*. Fundación Empresa Pública.
- Van der Veken, S., Bellemare, J., Verheyen, K. & Hermy, M. (2007). Life-history traits are correlated with geographical distribution patterns of western European forest herb species. *Journal of Biogeography*, 34(10), 1723–1735. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01738.x>
- Vega, J., Jiménez, E., Vega, D., Ortiz, L. & Pérez, J.R. (2011). *Pinus pinaster* Ait. tree mortality following wildfire in Spain. *Forest Ecology and Management*, 261(12), 2232–2242. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.019>
- Vega-Hidalgo, J.A. (1999). Historia del fuego de *Pinus pinaster* y *Abies pinsapo* en la cara norte de Sierra Bermeja (Málaga): 1817-1997. En Araque-Jiménez, E. (Ed.), *Incendios históricos. Una aproximación multidisciplinar* (pp. 279–312). Universidad Internacional de Andalucía.
- Vernet, J.L., Ogereau, P., Figueiral, I., Machado, C. & Uzquiano, P. (2001). *Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents, Sud-Ouest de l'Europe: France, Péninsule ibérique et Îles Canaries*. CNRS.
- Walsh, K., Richer, S. & de Beaulieu, J. (2006). Attitudes to altitude: changing meanings and perceptions within a 'marginal' Alpine landscape – the integration of palaeoecological and archaeological data in a high altitude landscape in the French Alps. *World Archaeology*, 38(3), 436–454. <https://doi.org/10.1080/00438240600813392>

BLOQUE IV

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES



16. DISCUSIÓN GENERAL

16.1. Los resultados obtenidos confirman la hipótesis de partida

La identificación de diferentes fragmentos de madera carbonizada identificados como género *Abies* en cuatro localizaciones de la Serranía de Ronda en las que actualmente este taxón no está presente, caso de Palmitera 1, Jarastepar 2, Fuenfría Alta y Arroyo en los Lobos 1, permite confirmar la presunción de partida. Junto a ello, también queda demostrada la antigüedad de algunas de las masas de pinsapo que existen en la actualidad, como el pinsapar de los Reales de Sierra Bermeja, población que podría haber estado presente en este sector peridotítico durante, al menos, los últimos 9810 años cal BP.

En conjunto, los datos obtenidos permiten confirmar una mayor extensión de los pinsapares de *A. pinsapo* en la Serranía de Ronda durante los últimos milenios. Esta hipótesis fue propuesta originalmente por Linares (2011), quien, a partir de diferentes registros fósiles de antiguos taxones de abetos circunmediterráneos, señaló la existencia de un antepasado común que se distribuía ampliamente por el Mediterráneo Occidental durante el Terciario.

Asimismo, los resultados obtenidos son coincidentes con los derivados del resto de fuentes disponibles, como los análisis paleopolínicos, los MDE y los testimonios históricos. Respecto a los primeros, Alba-Sánchez & López-Sáez (2013) confirmaron la presencia de polen de *A. pinsapo* en el litoral suribérico en diferentes momentos del Pleistoceno Superior y Holoceno. En la Cueva de Gorham (Gibraltar), un estudio llevado a cabo por Finlayson et al. (2008) documentó polen de *Abies* con cronologías situadas entre 19 000 y 16 000 años cal BP. En la Cueva del Bajondillo (Torremolinos, Málaga), López-Sáez et al. (2007) identificaron varios niveles con polen fósil de pinsapo. Su aparición en el registro polínico comienza hace 50 000-42 000 años cal BP, volviendo a manifestarse de forma significativa durante el periodo comprendido entre 40 000 y 38 000 años cal BP. Posteriormente, la señal de polen de pinsapo disminuye, informando acerca de una presumible regresión de sus poblaciones bajo condiciones más restrictivas para la especie. Tras la breve recuperación de la superficie ocupada por el pinsapo durante el Interestadío Bölling/Allerod (13 000-11 000 años cal BP), en el Holoceno se constata la progresiva disminución de la señal de *Abies* en este emplazamiento costero (Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013). Una vez que se inicia la constatada recuperación climática del Holoceno (Mauri et al., 2015), la especie migra hacia altitudes más elevadas en busca de condiciones menos limitantes. Esta eventual dinámica se apoya en la citada disminución de la señal de polen de pinsapo en zonas litorales del sur peninsular, al tiempo que, en zonas más elevadas como la turbera de El Padul (722 m s.n.m.) y el Circo de Río Seco (3120 m s.n.m.), ambas en Sierra Nevada, el registro polínico sigue informando de la presencia del género *Abies* en diferentes fases del Holoceno. Esta señal alcanza, en el caso de El Padul, porcentajes superiores al 5 % durante el Dryas reciente (11 000-10 000 años cal BP), para ir desapareciendo posteriormente; mientras, en el segundo caso, la última evidencia polínica de

pinsapo aparece hace apenas 1500 años cal BP (Valle et al., 2003), si bien su significación en el diagrama polínico es mínima.

Por su parte, algunos MDE también informan de esta mayor extensión teórica del pinsapo en el pasado, destacando los trabajos realizados por Navarro-Cerrillo et al. (2006), Sánchez-Salguero (2007), Alba-Sánchez et al. (2010), Alba-Sánchez & López-Sáez (2013), Gutiérrez-Hernández et al. (2017) y Gutiérrez-Hernández (2018). Estas modelizaciones, a partir de pautas de idoneidad y regresiones multivariantes, establecen diferentes grados de potencialidad de esta especie en relieves montañosos del sur, sureste y este de la península ibérica, entre los cuales se incluyen, además de la Serranía de Ronda, sierras como las de Almirante, Tejeda, Sierra Nevada, Cazorla, Segura y Aitana, entre otras. Respecto al conjunto rondeño, cabe destacar que los modelos muestran una idoneidad muy elevada de *A. pinsapo* en todas aquellas localizaciones fisiográficas situadas por encima de los 1000 m s.n.m. Dentro del rango óptimo de distribución pretérita (ver Alba-Sánchez et al., 2010; Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013) se incluyen las diferentes paleopoblaciones de *Abies* halladas en la presente investigación, las cuales se circunscriben a macizos como Sierra Palmitera, Sierra del Oreganal y Sierra Blanca de Igualeja.

De forma similar, aunque con una escala temporal mucho más limitada, los testimonios históricos también permiten comprobar que el área de distribución de los pinsapares en el pasado era mayor que en la actualidad, si bien, por lo general, son escasas las referencias documentales sobre este abeto o su presencia en el paisaje vegetal rondeño (Guzmán et al., 2013). En este apartado destaca la información recopilada en diferentes documentos por autores como Gil (2002), Gómez-Zotano (2003, 2006) y Becerra (2006), entre los que se incluyen las Ordenanzas Municipales de la ciudad de Ronda y su jurisdicción en 1508, las Ordenanzas Municipales de la villa de Zahara de la Sierra en 1575, los Inventarios de Maderas para abastecer a la Marina o para la construcción de viviendas en Villaluenga en 1754 y 1766, las Noticias sobre el "Pino del Oso" utilizado como mojón en el deslinde entre Ronda y Tolox en 1635, 1809 y 1870 o las Preguntas Generales y Particulares del Catastro del Marqués de la Ensenada para los distintos pueblos de la comarca a mediados del siglo XVIII. Sin embargo, no fue hasta mediados del siglo XVIII cuando se dispusiera de la primera aproximación cuantitativa a la extensión del pinsapo, en este caso correspondiente a la información proporcionada por las Cartas Geográficas o Mapas Generales de los Pueblos y sus Principales Arboledas de las provincias de la Marina. Finalmente, se observa un incremento significativo de las referencias al pinsapo a partir del siglo XIX gracias a testimonios escritos de viajeros, cazadores, ingenieros y naturalistas (Guzmán et al., 2013), entre los que se incluyen Simón de Rojas Clemente en 1809, Charles Edmond Boissier en 1837, Samuel Edward Cook Widdrington en 1829 y 1839, Moritz Willkomm en 1844, Antonio Laynez en 1858, Mariano Laguna en 1868, Abel Chapman y Walter J. Buck en 1907, Luís Ceballos y Manuel Martín Bolaños en 1928 y 1930, A. Barbey en 1930, y Luís Ceballos y Carlos Vicioso en 1933.

16.2. Nuevos datos sobre la distribución y dinámica pretérita de *Abies pinsapo*

Es importante señalar que las fuentes citadas con anterioridad no proporcionan la suficiente precisión espacial como para confirmar la presencia histórica de *Abies pinsapo* fuera de su actual rango de distribución. En consecuencia, hasta el momento no se disponía de información contrastada que permitiera corroborar la hipótesis de partida. Asimismo, tal y como señalan Alba-Sánchez & López-Sáez (2013), la Serranía de Ronda, a pesar de erigirse como territorio exclusivo en el que habita de forma natural el pinsapo, apenas había sido estudiada desde un enfoque paleobiogeográfico, destacando únicamente las investigaciones llevadas a cabo por Gómez-Zotano et al. (2015, 2017, 2018) y Olmedo-Cobo et al. (2017, 2018, 2019ab). A ello se suma que las señales polínicas de *Abies* detectadas en aquellos emplazamientos próximos al conjunto rondeño disminuyen significativamente, o incluso desaparecen, una vez comenzado el Holoceno (Carrión, 2012, 2022).

En consecuencia, el registro pedoantracológico obtenido en varias localizaciones de la Serranía de Ronda representa un importante avance en materia de paleobiogeografía del pinsapo durante el Holoceno en la Serranía de Ronda. Los resultados permiten confirmar la presencia pretérita de *Abies* en diferentes relieves montañosos en los que este género no está presente en la actualidad, avalando de esta manera la mayor extensión del pinsapar en el pasado. Al mismo tiempo, se ha obtenido información inédita acerca de las dinámicas experimentadas por ese singular taxón durante los últimos 10 000 años. Serían Gómez-Zotano et al. (2015, 2017) y Olmedo-Cobo et al. (2016, 2017) quienes descubrieran por primera vez carbón de *Abies* en una localización en la que actualmente este abeto amenazado no está presente, concretamente en las inmediaciones del pico Encinetas en la Sierra Palmitera (dentro del conjunto fisiográfico peridotítico de Sierra Bermeja). Aquí, un total de 15 rangos cronológicos para *Abies* y 7 para *P. pinaster* muestran cómo pudo ser la dinámica de la vegetación a escala local tras el Último Máximo Glacial. *Abies* podría haber sido el taxón arbóreo más representativo del paisaje vegetal de Sierra Palmitera durante las primeras fases del Holoceno. Posteriormente, y tras un breve periodo de convivencia de pinares y abetales hace 7500-8000 años cal BP, el sometimiento del macizo a condiciones más templadas y secas (Jalut et al., 2000), unido al constatado incremento de la actividad antropogénica en el sur peninsular como consecuencia de la revolución neolítica (Morgado-Rodríguez & Martínez-Fernández, 2005; González-Hidalgo, 2009; Cortés-Sánchez et al., 2010), crearían un escenario muy adverso para el pinsapo, que en última instancia podría haber provocado que este abeto desapareciera definitivamente de Sierra Palmitera hace unos 5000-4000 años (Olmedo-Cobo et al., 2016, 2017).

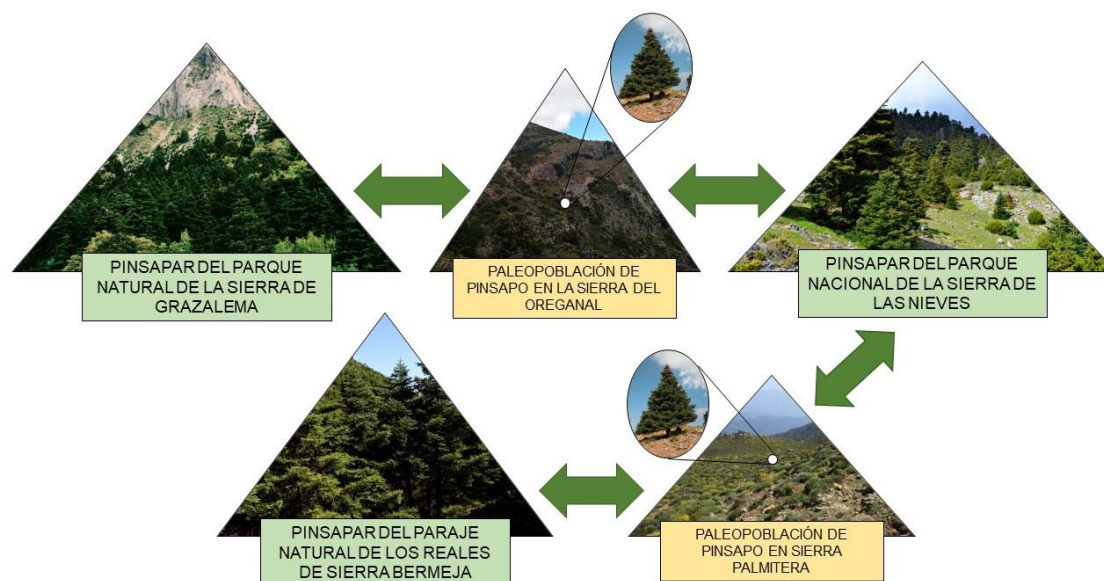
Asimismo, las nuevas paleopoblaciones y poblaciones antiguas de *Abies* halladas durante la presente investigación, estas últimas con cronologías de hasta 500 años cal BP, denominadas Jarastepar 2, Fuenfría Alta y Arroyo de los Lobos 2, han permitido que se pueda seguir avanzando en la paleobiogeografía del pinsapo. Tanto Jarastepar 2 como Fuenfría Alta confirman la presencia del género *Abies* en sendos enclaves hace 10 000-9500 años, tal y

como ocurría en Palmitera 1, localizaciones todas ellas situadas por encima de los 1100 m s.n.m. Ello demuestra la importancia que determinados relieves montañosos del conjunto rondeño, entre los que se incluyen sierras como Palmitera, Oreganal y Blanca de Igualeja, podrían haber desempeñado como refugios para el pinsapo durante el Holoceno. Este periodo, que comenzó tras la finalización del Dryas Reciente (12 900-11 700 años cal BP) (Rasmussen et al., 2006), supuso una etapa de importantes dinámicas climáticas y biogeográficas en muchas partes del continente europeo, como el sur de la península ibérica (Cortés-Sánchez et al., 2008). Destaca, entre otros aspectos, por un progresivo calentamiento del clima (Jalut et al., 2000), lo que podría haber motivado que la Serranía de Ronda, como enclave estratégico del sur peninsular, se convirtiera en refugio de aquellas especies mejor adaptadas a climas templados (Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013), una hipótesis que no había podido ser validada hasta ahora para el caso de *A. pinsapo*.

En el caso de Fuenfría Alta, la dinámica de la floresta muestra gran similitud a la experimentada en Palmitera 1, en la cercana Sierra Bermeja. De esta manera, tras dominar el paisaje vegetal hace casi 10 000 años, el abetal pudo dejar paso a otras formaciones arbóreas mejor adaptadas a las condiciones más cálidas y secas que instalaron en el sur peninsular durante el Holoceno medio (Jalut et al., 2000). Es posible que el pinar de pino resinero aprovechara las pulsaciones más cálidas del Holoceno para expandirse hasta ocupar territorios contiguos al abetal. Al mismo tiempo, y junto a este escenario climático favorable para *P. pinaster*, la especie pudo haber aprovechado su mayor tolerancia al fuego para acabar desplazando definitivamente al pinsapo, algo que según el registro pedoantracológico podría haber ocurrido hace 5000-4000 años cal BP, en línea con lo acontecido en Palmitera 1 (Olmedo-Cobo et al., 2017, 2019ab).

La identificación de carbón de *Abies* en Sierra Palmitera y Sierra del Oreganal supone, además, encontrar la conexión de las tres masas actuales de pinsapo, hoy desconectadas geográficamente (Figura 51). Estos enclaves posibilitaron tanto la conexión de las poblaciones de la Sierra de las Nieves y Sierra Bermeja, caso de Palmitera 1 y Fuenfría Alta, como las de la Sierra de las Nieves y Sierra de Grazalema, caso de Jarastepar 2. Las cronologías obtenidas muestran que el pinsapo estuvo presente en estos tres enclaves durante los primeros albores del Holoceno (10 000-9500 años cal BP), un momento crítico en el que especies sensibles a condiciones más cálidas y secas, como el pinsapo (Arista, 1993; López-Quintanilla, 2013; Gutiérrez-Hernández et al., 2017), se fueron desplazando paulatinamente hacia zonas de mayor altitud en busca de condiciones más favorables para su desarrollo (Alba-Sánchez et al., 2018; González-Hernández, 2021). Ello explica el descenso de las señales polínicas de *Abies* en zonas próximas al litoral una vez que finalizó el Último Máximo Glacial (ver Alba-Sánchez & López-Sáez, 2013; Carrión, 2012, 2022).

Figura 51. Poblaciones actuales de *A. pinsapo* y principales paleopoblaciones descubiertas mediante el análisis pedoantracológico.



Fuente: autoría propia.

16.3. Los relieves montañosos de la Serranía de Ronda como refugios postglaciales de coníferas de montaña

La información colectada ha informado acerca de cómo los relieves montañosos de la Serranía de Ronda, por su situación estratégica, pudieron haber desempeñado un importante papel como refugios postglaciales del pinsapo durante el Holoceno. Paralelamente, el hallazgo de varios fragmentos de carbón pertenecientes a *Pinus* tipo *nigra/sylvestris* plantea que este sector occidental de la Cordillera Bética también pudo servir de refugio para otras coníferas propias de ambientes fríos, como ciertos pinares altimontanos de *Pinus nigra* o *Pinus sylvestris*, actualmente ausentes en el conjunto de la Serranía de Ronda.

En concreto, la investigación pedoantracológica llevada a cabo ha posibilitado el descubrimiento de varios fragmentos pertenecientes al género *Pinus* en localizaciones en las que este taxón no está presente actualmente. Cabe destacar que, en la mayoría de los casos, el reducido tamaño de las muestras, unido al mal estado de conservación de las mismas, no ha permitido discriminar el nivel de especie. Es el caso de la Sierra del Tablón, relieve situado en la provincia de Sevilla y que constituye el límite septentrional de la Serranía de Ronda. Aquí, la identificación de un fragmento de *Pinus* sp., cuya edad se ha establecido en 14 013-13 440 años cal BP, arroja numerosas incógnitas en torno a qué tipo de vegetación fue la protagonista del estrato arbóreo durante la transición Pleistoceno-Holoceno. Si bien existe constancia de la destacada significación que *P. pinaster* tuvo en el paisaje holoceno del extremo occidental de la Cordillera Bética (Carrión et al., 2004; Gómez-Zotano et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2019ab), es probable que fuera otra especie del género *Pinus*, de carácter más criófilo, la que estuviera presente en la Sierra del Tablón durante el Tardiglacial. Los motivos que apoyan esta

hipótesis son varios. En primer lugar, porque durante la señalada época el macizo estaba dominado por condiciones propias del piso bioclimático supramediterráneo-superior (Badal et al., 2013), una circunstancia que, en principio, pudo plantear un escenario más desfavorable para ciertos pinares termófilos, como los constituidos por *P. pinaster*, una especie sensible a heladas de cierta intensidad (Alía & Martín, 2009). Paralelamente, autores como Carrión et al. (2008, 2010), López-Sáez et al. (2008) y Fernández et al. (2021) hallaron evidencias palinológicas y antracológicas de *Pinus* tipo *nigra/sylvestris* –con cronologías milenarias– en diferentes puntos del sur y suroeste peninsular, si bien ninguno de los yacimientos analizados se situaba dentro de los límites histórico-geográficos de la Serranía de Ronda. El único testimonio disponible para el conjunto rondeño procede del estudio polínico realizado por Alba-Sánchez et al. (2021) en la Cañada de las Ánimas (Sierra de las Nieves), donde los autores detectaron la presencia de *Pinus* tipo *nigra/sylvestris* durante el Holoceno tardío.

A pesar de la dificultad que entraña distinguir desde el punto de vista antracológico el nivel de especie dentro del género *Pinus*, algo que también es inherente a otras disciplinas paleoecológicas, como la palinología (Willis et al., 1998), en algunos casos la presente investigación ha podido discriminar más allá del género *Pinus*. De este modo, ha sido posible la identificación de varios carbones atribuidos al grupo taxonómico *Pinus* tipo *nigra/sylvestris* en dos localidades de Sierra Blanca de Igualeja, concretamente en Arroyo de los Lobos 1 y Cascajares 4. Ello ha sido posible gracias al reconocimiento de varias características anatómicas clave de este grupo taxonómico, entre las que destacan la presencia de canales resiníferos en el plano transversal y la existencia de punteaduras fenestriiformes en el campo de cruces del plano longitudinal radial, que son dos de los rasgos identificativos de dicho grupo (Vernet et al., 2001).

Por su parte, las cronologías de *Pinus* obtenidas, un total de 9, han sido fechadas entre 10 645 y 8013 años cal BP. Las implicaciones paleoecológicas derivadas de estos datos son múltiples. Por un lado, los resultados confirman la presencia de un grupo taxonómico actualmente ausente en la Serranía de Ronda, como es *Pinus* tipo *nigra/sylvestris*. Cabe destacar que la mayor proximidad de ciertas masas relictas de *P. nigra* frente a *P. sylvestris* (EUFORGEN, 2022), permite suponer que los carbones identificados como *Pinus* tipo *nigra/sylvestris* pertenezcan con mayor probabilidad a *P. nigra*. Asimismo, el gran nivel de precisión que acompaña a la información obtenida, tanto desde el punto de vista taxonómico como desde los prismas espacial y temporal, también ha posibilitado la reconstrucción de la distribución pretérita de la vegetación arbórea en Sierra Blanca, un macizo montañoso de gran interés biogeográfico en el conjunto de la montaña rondeña (Gómez-Zotano et al., 2020; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021). Por otro lado, los datos paleoecológicos obtenidos refuerzan la hipótesis sobre el destacado papel de los pinares en el sur peninsular durante la transición Pleistoceno-Holoceno, unos resultados que son concordantes con los señalados por Carrión et al. (2010) para el conjunto de la península ibérica. Tras haber colonizado incluso el piso bioclimático termomediterráneo durante el Máximo Tardiglacial (14 670-12 890 años cal BP), el comienzo del periodo Holoceno supuso la desaparición gradual de estos pinares altmontanos

de aquellas franjas próximas al litoral (Badal et al., 2013). Esta nueva etapa, caracterizada por un aumento de la temperatura media, conllevó que aquellos taxones propios de ambientes fríos tuvieran que colonizar altitudes más elevadas en busca de mejores condiciones para su desarrollo. Es precisamente lo que pudo haber ocurrido con *Pinus* tipo *nigra/sylvestris* en la Serranía de Ronda, un grupo taxonómico que encontró su particular refugio en determinados relieves montañosos de la Cordillera Bética occidental, como Sierra Blanca. Aquí, los datos paleoecológicos obtenidos en el presente estudio han demostrado que *Pinus* tipo *nigra/sylvestris* estuvo presente en el Holoceno temprano durante, al menos, ~2500 años.

En su conjunto, la información pedoantracológica obtenida durante la presente investigación, contextualizada con aquellos datos proporcionados por otras fuentes paleoecológicas complementarias, confirma el rol principal –y no secundario– que determinadas coníferas, como *A. pinsapo* y *Pinus* tipo *nigra/sylvestris*, desempeñaron tanto en Sierra Blanca como en el conjunto de la Cordillera Bética occidental durante la transición Pleistoceno-Holoceno. Tras el Último Máximo Glacial, yacimientos costeros como Gorham o el Bajondillo, que sirvieron de refugio para ambas coníferas durante las pulsaciones más frías del citado periodo (Carrión, 2012), dejaron de reunir las condiciones mesológicas adecuadas para sendos taxones, lo que les obligó a buscar nuevos nichos ecológicos en cotas más elevadas. De esta forma, la Serranía de Ronda se convirtió en un importante refugio para abetales y pinares de alta montaña durante el Holoceno, erigiéndose como el bastión más suroccidental para estos últimos, una hipótesis que hasta el momento no había podido ser validada. Por tanto, los resultados obtenidos constituyen una información de enorme interés en el contexto del sur de Iberia, ya que no hay que olvidar que esta región constituye uno de los territorios peninsulares que cuenta con menos fuentes de información paleobotánica, a excepción de algunos sectores de la franja costera (Morla et al., 2000).

Los mecanismos que controlaron los cambios en la vegetación y pudieron motivar la desaparición del grupo taxonómico *Pinus* tipo *nigra/sylvestris* en el conjunto rondeño seguramente presentaron una naturaleza mixta. En primer lugar, y desde el punto de vista natural, el progresivo aumento de la temperatura acontecido a lo largo de los últimos 10 000 años (Mauri et al., 2015), junto a la oceanidad que caracteriza a aquellas montañas más expuestas a la influencia atlántica y a los levantes, como ocurre con Sierra Blanca (Gómez-Zotano et al., 2020), pudieron haber provocado que estos importantes refugios crípticos pasasen a ser enclaves poco competitivos para los pinares de alta montaña (Morla et al., 2000). En segundo lugar, y no menos importante, los factores humanos también pudieron desempeñar un papel fundamental a la hora de reducir el área de distribución de estos pinares orófilos. Existe constancia acerca de la creciente intensificación antrópica a comienzos del Neolítico en el ámbito de estudio y zonas periféricas (Ramos-Muñoz et al., 2017; Castaño-Aguilar, 2021). De hecho, la cercana Cueva del Toro, localizada en el Torcal de Antequera, constituye uno de los yacimientos neolíticos de la península ibérica en el que se documenta mayor variedad de leguminosas, lo que pone de manifiesto tanto la importancia de esta categoría de plantas cultivadas ya en el Neolítico, como la significación de la revolución

neolítica en la aparición de nuevas formas de gestión del territorio y de sus recursos (Rodríguez-Ariza, 2004). En conjunto, estos factores pudieron ser los responsables de provocar la extinción de los pinares altimontanos presentes en la Serranía de Ronda durante las primeras fases del Holoceno, relegándolos hasta su rango de distribución actual (Catalan-Bachiller, 1991; Castro et al., 2005).

16.4. Importancia del fuego en la configuración y modelado del paisaje vegetal rondeño

El fuego se reconoce como el principal factor responsable de la eliminación de la cubierta vegetal, un proceso que determina un aumento en las tasas de erosión y de degradación del suelo (Martínez-Murillo et al, 2016). No obstante, y lejos de constituir una adversidad desde el punto de vista ecológico, este fenómeno –con independencia de su origen– ha sido históricamente una pieza fundamental en la configuración y modelado del paisaje vegetal mediterráneo (Keeley et al., 2012), constituyendo un elemento clave a la hora de comprender su riqueza florística (Bond & Keeley, 2005). También lo ha sido en multitud de territorios de la península ibérica. Especialmente estudiada ha sido el norte de la misma, donde diferentes investigaciones llevadas a cabo por Carracedo-Martín (2015), Pèlachs et al. (2015, 2016) y Pérez-Obiol et al. (2012, 2015, 2016) han revelado cómo el fuego ha sido, desde tiempos prehistóricos, un elemento clave en la formación de los paisajes de los principales sistemas montañosos noribéricos, como el Pirineo y la Cordillera Cantábrica. En el sur peninsular, sin embargo, el análisis de los regímenes de paleo-incendios durante el Holoceno ha recibido menos atención en términos de investigación. Todo ello a pesar de que, a diferencia de lo que sucede en el norte de España (Carracedo et al., 2017), las condiciones ambientales de las montañas meridionales de Iberia son, en principio, más favorables para que el fuego se propague fácilmente por razones naturales, con tormentas con aparato eléctrico ocurridas al final del cálido y seco estío que pudieron ser las responsables de un importante número de incendios forestales (Marañona, 1997).

Hasta el momento, la geografía holocena de los incendios forestales en el sur peninsular ha podido ser inferida a partir de los datos procedentes de diferentes investigaciones palinológicas y antracológicas. Prácticamente la totalidad de estos ensayos han sido aplicados en contextos arqueológicos, tal y como se extrae de la síntesis realizada por Carrión (2012, 2022). Por su parte, en entornos más naturalizados sobresalen los trabajos realizados en diferentes relieves montañosos del sur peninsular, como los llevados a cabo por Anderson et al. (2011), Jiménez-Moreno & Anderson (2012), Manzano et al. (2019) en Sierra Nevada; Carrión et al. (2003) en Sierra de Gádor; Carrión et al. (2007) en la Sierra de Baza; y Carrión et al. (2004) en la Sierra de Segura. Llama la atención cómo estas investigaciones se han concentrado en la mitad oriental de la región andaluza, coincidiendo con el sector central de la Cordillera Bética, mientras que el extremo occidental de la misma, en el cual se incluye la Serranía de Ronda, apenas ha sido estudiado desde el punto de vista paleoecológico, tal y como recogen determinadas fuentes (véase GLOBAL PALEOFIRE DATABASE, 2022 y Harrison et al., 2021).

En consecuencia, los datos pedoantracológicos obtenidos con esta investigación suponen un importante avance en esta materia para el territorio de la Serranía de Ronda. Las cronologías demuestran cómo el fuego ha sido un fenómeno que ha estado presente a lo largo de todo el Holoceno en este vasto territorio montañoso. En algunos casos, se han obtenido valores de antracomasa excepcionalmente elevados, como en Palmitera 1 (Sierra Bermeja), con cifras que han alcanzado los 137 379,3 mg/kg. Este valor contrasta con los obtenidos en otros sistemas montañosos de la península ibérica en los que también se ha aplicado la pedoantracología. Así, en un estudio llevado a cabo por García-Álvarez et al. (2017) en el Sistema Central, los valores máximos de antracomasa se situaron en 46 868 mg/kg. Por su parte, Cunill (2010) y Cunill et al. (2012, 2013) obtuvieron una antracomasa de 1730 mg/kg en el Pirineo catalán, mientras que en la Cordillera Cantábrica Beato-Bergua et al. (2019) obtuvieron antracomاسas inferiores a 30 mg/kg. En este último relieve montañoso del norte peninsular, los reducidos valores de antracomasa, en línea con los obtenidos en algunas localidades de naturaleza carbonatada de la Serranía de Ronda, caso de Cancha de Almola, Jarastepar 1 y 2 o Puerto de Lifa, entre otras, podrían relacionarse con la escasa capacidad de los suelos calizo-dolomíticos para retener el carbón. No obstante, el número de estudios pedoantracológicos aplicados sobre materiales sedimentarios en España es aún muy reducido, lo que obliga a seguir siendo prudentes a la hora de interpretar esta hipotética correspondencia.

En cualquier caso, la antracomasa de Palmitera 1, contextualizada con los rangos cronológicos obtenidos a partir de la datación radiocarbónica de 27 carbones, advierte de la importancia que pudieron tener los incendios forestales en la estructura y dinámica de la vegetación de Sierra Palmitera durante el Holoceno. En última instancia, esta concatenación de perturbaciones en forma de incendios podría haber provocado la extinción local del pinsapo a partir del Holoceno medio (Olmedo-Cobo et al., 2017). Esto es extensible al conjunto de Sierra Bermeja, donde hasta 19 cronologías (10 en Reales 1 y 9 en Reales 2) informan de varios episodios de fuego a lo largo de los últimos milenios. De hecho, los incendios son, desde hace décadas, un fenómeno muy presente en el macizo bermejense, tal y como advierte Vega-Hidalgo (1999), quien ha establecido un periodo de recurrencia de 14.5 años para el periodo comprendido entre 1817 y 1997.

Las antracomاسas obtenidas en otros sectores de la Serranía de Ronda, si bien muestran valores más reducidos, constituyen un primer marco de referencia para el conocimiento de los incendios forestales durante el Holoceno en el extremo occidental de la Cordillera Bética. Los resultados derivados de las 110 dataciones radiocarbónicas disponibles para el conjunto de la Serranía de Ronda informan de una recurrencia casi ininterrumpida del fuego durante buena parte del Holoceno, si bien se ha constatado la existencia de 2 hiatos, fechados en ~6500-5800 y ~5200-4300 años cal. BP. La posible reducción de la frecuencia de incendios durante los intervalos mencionados pudo estar influenciada por diversos factores. En primer lugar, por la existencia de condiciones ambientales significativamente más húmedas que, en el sur peninsular, tuvieron lugar hace ~7000-6000 años (Carrión et al., 2007; Fernández et al., 2007).

Esta dinámica climática pudo provocar un escenario menos favorable para la propagación natural del fuego, una eventualidad que muestra concordancia con lo acontecido en otros registros paleoecológicos regionales, como en la Sierra de Segura (Carrión, 2002), en la Sierra de Baza (Carrión et al., 2007) o en la Sierra de Gádor (Carrión et al., 2003), donde la concentración de microcarbones para el citado lapso temporal es muy reducida. Sin embargo, el segundo hiato, comprendido entre ~5200-4300 años cal. BP, difiere con lo ocurrido en otras partes del sur y sureste peninsular. Este periodo se caracterizó por un incremento de la aridez (Schirrmacher et al., 2019), algo que previsiblemente también pudo afectar al conjunto de la Serranía de Ronda, especialmente si se tiene en cuenta que durante el Holoceno Medio no fue tan acusado el gradiente de precipitación oeste-este actual en el sur de la península ibérica (Liu et al., 2023). Bajo este contexto, en el sureste de Iberia tiene lugar un importante declive forestal, con concentraciones significativas de carbón en el entorno de Cabo de Gata, lo que advierte de una mayor frecuencia del fuego en este sector (Burjachs & Expósito, 2015). Sin embargo, en la Serranía de Ronda este proceso no parece haberse manifestado de la misma manera. El motivo de esta escasa significación del fuego en el conjunto rondeño durante el intervalo 5200-4300 años cal BP pudo estar relacionado con la limitada presencia humana en cotas medias y altas de la Serranía de Ronda durante el Neolítico medio, que en este momento ocuparía preferentemente tanto las zonas próximas al litoral mediterráneo como la depresión de Ronda (Acosta, 1995; Ramos-Muñoz et al., 2017; Castaño-Aguilar, 2021).

Finalmente, 49 de los 110 rangos cronológicos obtenidos han revelado una antigüedad inferior a 2000 años. Estos datos parecen indicar un aumento en la frecuencia de los incendios forestales durante los últimos dos milenios, una información que muestra plena concordancia con las aportaciones procedentes de los diferentes testimonios históricos y de los análisis paleoecológicos disponibles. Sweeney et al. (2022) señalan que la influencia de las actividades humanas en los regímenes de incendios durante el período comprendido entre 10 000 y 3500 años cal. BP fue limitada en el conjunto de la península ibérica, siendo el impacto antropogénico más reconocible en los últimos milenios (Gil-Romera, 2010). Asimismo, los trabajos coordinados por Carrión (2012, 2022), que representan la contribución más significativa en términos paleobotánicos a nivel de la península ibérica, también informan de esta mayor incidencia del fuego durante el Holoceno tardío en el sur peninsular. En la Sierra de Gádor, por ejemplo, existe una alta concentración de microcarbones hacia 1620-1760 años cal BP, informando de la gran significación que el fuego pudo tener en dicho periodo (Carrión et al., 2003). Algo similar ocurre en otras localizaciones montañosas del extremo meridional peninsular, como la Sierra de Baza, donde Carrión et al. (2007) detectaron altas concentraciones de microcarbones en varios momentos del Holoceno reciente, especialmente hace ~1800-1900 años cal BP. En el caso del análisis de los carbones sedimentarios realizado por Anderson et al. (2011) en la Laguna de Río Seco (Sierra Nevada), se encontró un incremento significativo de los incendios durante los últimos 3000 años cal BP. En la Sierra de Tejada, el análisis polínico llevado a cabo por Abel-Schaad et al. (2017) identificó un aumento en la intensidad de las actividades humanas en el área durante los últimos 3000 años.

Respecto a la Serranía de Ronda, el único estudio palinológico disponible, realizado por Alba-Sánchez et al. (2019) en la Cañada de las Ánimas (Sierra de las Nieves), apunta a una notable disminución de ciertas masas forestales, como los pinsapares, durante los últimos ocho siglos. En concreto, la destacada concentración de microcarbones en el sondeo, y que fue especialmente intensa durante los últimos 2 siglos, pudo ser uno de los responsables directos de la degradación del entorno natural rondeño. En última instancia, esta dinámica regresiva es el reflejo de los constantes procesos de deforestación y la creciente intensificación de la producción agrícola que ha venido experimentando la montaña rondeña desde hace siglos, especialmente en época contemporánea (Ramos-Muñoz et al., 2017; Gómez-Zotano & Olmedo-Cobo, 2021),

16.5. La utilidad de la pedoantracología como disciplina paleoecológica para la conservación de especies en peligro de extinción

La información paleoecológica obtenida durante la presente investigación supone una valiosa aportación para la reconstrucción del área de distribución del pinsapo en el pasado. Contextualizada con el resto de fuentes de análisis consideradas (testimonios históricos, estudios de hábitats, MDE), esta información puede ofrecer algunas pistas que ayuden a orientar determinadas actuaciones dirigidas a la gestión adaptativa de especies en peligro de extinción, como el pinsapo.

En concreto, este trabajo se ha integrado en las siguientes Líneas Estratégicas del Programa Sectorial del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación para la realización de proyectos de investigación que tengan implicación en la gestión de los pinsapares y especies asociadas: a) Estudios paleobotánicos que ayuden a interpretar la dinámica de las poblaciones de pinsapo asociada a los cambios climáticos cuaternarios; b) Distribución histórica de los pinsapares.

Los resultados obtenidos, integrados de forma coherente con la información previa disponible (ver Gómez-Zotano et al., 2017; Olmedo-Cobo et al., 2017, 2019ab), así como con los datos procedentes del resto de fuentes disponibles, han posibilitado la realización de varias campañas de repoblación con *A. pinsapo* en diferentes localizaciones de la Serranía de Ronda. Destaca en este apartado la reintroducción de la especie en 15 localidades de Sierra Bermeja en las que este abeto no está presente en la actualidad. Los enclaves seleccionados presentan una gran homogeneidad ecológica, con predominio de suelos serpentínicos, ombrotipo húmedo-hiperhúmedo, precipitaciones ocultas y piso bioclimático meso-supramediterráneo (Gómez-Zotano et al., 2018). Estas áreas coinciden, además, con nichos ecológicos potenciales para albergar *A. pinsapo*, tal y como avalan, por un lado, el modelo de idoneidad desarrollado por Navarro-Cerrillo et al. (2006) y, por otro, la existencia de matorral serial propio de los bosques serpentínófilos de *A. pinsapo* (Gómez-Zotano et al., 2015). Asimismo, existe constancia histórica y pedoantracológica que atestigua que el pinsapo estuvo presente en

dichos territorios en el pasado, evidencias que respaldan la validez y eficacia de las actuaciones anteriormente señaladas.

Recientemente se han llevado a cabo otras actuaciones de reintroducción del pinsapo igualmente destacables. Estas acciones, vinculadas al proyecto liderado por José Gómez Zotano “Camino hacia al pinsapar” (GRAMA2022-10), se fundamentan en los resultados pedoantracológicos obtenidos tanto en el proyecto PALEOPINSAPO (CSO2017-83576-P), financiado por el Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, como en aquellos alcanzados a través del presente proyecto de tesis doctoral. Dichos resultados han posibilitado la plantación de hasta 250 ejemplares de *A. pinsapo* en el principal acceso del Parque Nacional y Natural de la Sierra de las Nieves (Figura 52). Se trata de una medida primordial para recuperar el que un día fue uno de los bosques de pinsapo más singulares y accesibles de la Sierra de las Nieves, una joya natural que, sin embargo, fue talada de forma desproporcionada hasta hace apenas tres décadas, hasta que la declaración del Parque Natural de la Sierra de las Nieves (1989) puso fin a esta práctica cuyo único propósito era obtener un abeto que sirviera como ornamento navideño.

Figura 52. Plantación de *A. pinsapo* en el marco del proyecto “Camino hacia al pinsapar”.



Fuente: Francisca Fernández Castaño.

Asimismo, la información colectada permite complementar el Corredor Verde del Pinsapo propuesto por Gavira (2006), planteado originalmente para conectar los pinsapares del Parque Nacional de la Sierra de las Nieves y aquellos del Parque Natural de la Sierra de Grazalema. En esta conexión ecológica, la Sierra del Oreganal desempeñaría una función esencial al constituir la entidad montañosa de mayor entidad, tanto superficialmente como en altitud, entre ambos espacios naturales protegidos. Este y otros motivos –fundamentalmente fitogeográficos– llevaron a Pérez-Latorre (1997) a plantear la posibilidad de que el pinsapo pudiera haber estado presente en el pasado en esta localización fisiográfica. Gracias al registro pedoantracológico obtenido en esta investigación, el cual ha relevado la existencia de antiguas poblaciones de pinsapo en la Sierra del Oreganal, esta hipótesis ha podido ser validada.

Al mismo tiempo, los resultados pedoantracológicos derivados del presente proyecto de tesis doctoral han posibilitado el descubrimiento de otras paleopoblaciones de pinsapo, como las halladas en Sierra Palmitera y Sierra Blanca de Igualeja, circunstancia que plantea la necesidad de extender esta conexión ecológica hacia el sector peridotítico de la Serranía de Ronda (Gómez-Zotano et al., 2021). Esta medida posibilitaría la conexión de los tres principales pinsapares presentes en la actualidad, permitiendo cumplir con uno de los requerimientos legales establecidos por la Directiva Hábitat, como es el de promover la preservación de la conectividad y la integridad ecológica de la red de espacios naturales Natura 2000 (García-Quiroga & Abad-Soria, 2014). Asimismo, esta conectividad favorecería el intercambio genético inter-poblacional y la variabilidad genética, al tiempo que prevendría fenómenos de endogamia y deriva genética; facilitaría la suplementación de poblaciones pequeñas en declive, de forma que se frenarían las tendencias de extinción local; permitiría la recolonización de hábitats y el restablecimiento de poblaciones tras episodios de extinción local; favorecería el mantenimiento de mayor riqueza y diversidad de especies nativas en los fragmentos de hábitat; y proveería de hábitat, refugio y otros recursos necesarios a numerosas especies silvestres (Múgica et al., 2002; Hilty et al., 2020). En última instancia, ayudaría al pinsapo a ampliar su reducida área de distribución, una medida de vital importancia para combatir una de las principales causas de pérdida de biodiversidad a escala mundial: la fragmentación de hábitats (Farjalla et al., 2018).

17. CONCLUSIONES GENERALES

La aplicación del análisis pedoantracológico en el conjunto de la Serranía de Ronda ha permitido obtener nuevos datos acerca de la paleobiogeografía de *Abies pinsapo* en el sur peninsular. Hasta el momento, el análisis de los carbones vegetales presentes en el registro edáfico rondeño había constatado la existencia de una única población de *Abies* en Sierra Palmitera. Este proyecto de tesis doctoral ha permitido dar continuidad a aquella primera tentativa de conocer la dinámica pretérita del pinsapo, posibilitando el descubrimiento de tres nuevas paleopoblaciones en la Cordillera Bética Occidental. Una de ellas se localiza en la Sierra del Oreganal, mientras que las dos restantes se circunscriben a los límites geográficos de Sierra Blanca. De forma paralela, las cronologías derivadas de la datación radiocarbónica de diferentes carbones atribuidos al género *Abies* han confirmado la antigüedad de algunas de las masas relictas de pinsapo que habitan en sus áreas de refugio, como las localizadas en Los Reales de Sierra Bermeja.

También hay que destacar que, si bien el objeto de estudio principal de la investigación ha girado en torno a *A. pinsapo*, el estudio paleoecológico desarrollado durante la presente investigación ha posibilitado la identificación de otros taxones relevantes desde el punto de vista paleobiogeográfico. Sobresale la identificación de varios fragmentos de madera carbonizada de *Pinus* tipo *nigra/sylvestris* en Sierra Blanca. Por su parte, el género *Pinus*, sin poder precisar más nivel específico, ha sido descubierto en determinados sectores de Sierra Blanca, Sierra de Tolox, Sierra del Oreganal, Sierra del Pinar y Sierra del Pinar. Finalmente, también se ha confirmado la presencia del género *Fraxinus* en Cañada de Enmedio, una localidad de la Sierra de las Nieves en la que este taxón no está presente en la actualidad.

Los hallazgos conseguidos a través de este estudio proporcionan un importante volumen de información inédita sobre la distribución holocena del pinsapo en el sur peninsular, contribuyendo de manera significativa a cubrir una de las lagunas de conocimiento paleoecológico más importantes que afectaban al conjunto de la Serranía de Ronda. Además, esta información supone un avance sin precedentes a la hora de localizar, de forma inequívoca, aquellos enclaves montañosos que albergaron a este singular abeto en el pasado. Ello ha sido posible gracias a la elevada precisión espacial que proporciona la pedoantracología, una disciplina que hasta hace poco tiempo había sido escasamente aplicada en el sur peninsular, y que, una vez más, ha demostrado su enorme utilidad a la hora de reconstruir paisajes vegetales.

La mejora de conocimiento paleobiogeográfico no comprende únicamente a *A. pinsapo*, sino que también engloba a otras coníferas de montaña igualmente importantes desde el punto de vista ecológico y paisajístico en el contexto de la Cordillera Bética, como es el caso de *Pinus* tipo *nigra/sylvestris*. Dado que este grupo taxonómico se encuentra actualmente ausente en la Serranía de Ronda, este descubrimiento representa una contribución muy importante desde el punto de vista paleobiogeográfico, al tiempo que permite confirmar una mayor distribución de los pinares de pino laricio en el sector occidental de la Cordillera Bética. De esta manera, el

hallazgo de antiguas poblaciones de coníferas almontanas en distintas áreas geográficas de la Serranía de Ronda permite confirmar el destacado papel que desempeñaron los relieves montañosos rondeños como refugios postglaciales para los citados taxones. Estos datos se suman a la información previa disponible y permiten conocer la dinámica holocena de estas coníferas propias de ambientes más fríos que los típicamente mediterráneos. Tanto abetales como pinares laricios, que durante el Último Máximo Glacial se refugiaron previsiblemente en cotas bajas del extremo sur peninsular, se vieron obligados a ascender altitudinalmente en busca de condiciones más óptimas para su desarrollo una vez comenzó la mejora climática holocena. Ambas especies encontraron en la Serranía de Ronda su particular nicho ecológico. En el caso del pinsapo, si bien ha visto reducida su área de distribución a lo largo de los últimos milenios, ha logrado subsistir en este vasto conjunto montañoso hasta nuestros días. Todo ello a pesar del gran número de perturbaciones que han amenazado históricamente su supervivencia, como los incendios forestales, la tala indiscriminada o las plagas, entre otras muchas. La situación es visiblemente diferente en lo que respecta al pino laricio. Esta especie pudo refugiarse en el conjunto rondeño durante las primeras fases del Holoceno, extinguiéndose de este territorio en algún momento de dicho periodo hasta quedar circunscrito a sus actuales áreas de distribución.

En su conjunto, el registro pedoantracológico también permite aseverar la mayor significación que tuvo el arbolado en el pasado en la Serranía de Ronda. Además de las coníferas anteriormente señaladas, también han sido identificados otros géneros arbóreos que a día de hoy no están presentes en aquellas localizaciones en las que han sido hallados. Entre estos taxones destacan *Pinus* y *Fraxinus*, amén de otros géneros que tienen una escasa participación en el paisaje vegetal de determinadas áreas de la serranía, como *Taxus*, *Acer* y *Quercus* caduco. En última instancia, esta información no solo informa de una mayor extensión de la cobertura arbórea en el pasado, sino también de la mayor diversidad taxonómica del estrato arborescente.

Por su parte, el elevado número de dataciones radiocarbónicas realizadas ha revelado cómo los incendios forestales han sido un fenómeno muy frecuente en la Serranía de Ronda a lo largo del Holoceno. La alta precisión temporal de las cronologías obtenidas permite conocer el nivel de afectación que el fuego ha tenido sobre determinados taxones en territorios muy específicos. A este respecto, la recurrencia de estos eventos de fuego pudo ser la responsable de la extinción local del pinsapo en determinados sectores montañosos de la Serranía de Ronda, como la Sierra Palmitera y la Sierra del Oreganal, localizaciones en las que actualmente este abeto no está presente. Asimismo, los datos referentes a estos paleo-incendios coinciden con las conclusiones obtenidas para otros sectores de la Cordillera Bética, revelando cómo la actividad de los incendios forestales en la Serranía de Ronda se ha intensificado significativamente durante el Holoceno tardío. Este incremento se ha hecho mucho más evidente en los últimos siglos, coincidiendo con el comienzo de la Edad Contemporánea, donde el ser humano ha tenido un papel muy activo en la configuración del paisaje vegetal.

A pesar de los logros alcanzados es necesario señalar que, aunque este estudio ha tenido un impacto muy positivo en la mejora del conocimiento paleoecológico de la Serranía de Ronda, y especialmente en lo que se refiere a *A. pinsapo*, resulta necesario seguir profundizando en esta materia. No hay que olvidar que hasta hace menos de una década apenas existía información de amplio espectro temporal acerca de la distribución pasada del pinsapo en el sur peninsular, donde actualmente pervive la especie. Así pues, una de las siguientes tareas pasa por encontrar nuevas paleopoblaciones para este y otros taxones singulares en otros sectores de la Cordillera Bética, todo ello con el objetivo de alcanzar una comprensión más profunda de las dinámicas que la floresta bética ha experimentado en el pasado.

La aplicación del análisis pedoantracológico ha demostrado ser una solución muy eficaz a la hora de desentrañar la dinámica de la vegetación leñosa incendiada. De hecho, su empleo no solo ha permitido cumplir con los objetivos previstos, sino que también ha proporcionado información complementaria de enorme interés paleoecológico, enriqueciendo aún más los resultados de la investigación. Por lo tanto, es esencial seguir respaldando esta metodología, y ello pasa por seguir ampliando la red de muestreos pedológicos hacia otros sectores inexplorados de la Serranía de Ronda. Cabe mencionar que ya se está trabajando en esta cuestión. Durante los últimos meses se han realizado varias catas en diferentes puntos del ámbito de estudio. Los resultados preliminares están siendo, una vez más, prometedores, ya que están ofreciendo nuevas claves paleobiogeográficas para un amplio abanico de taxones, entre los que se incluyen *Abies*, *Pinus* tipo *nigra/sylvestris*, *Taxus baccata* y *Quercus caduco*. Asimismo, dentro del marco del proyecto de investigación PALEOPINSAPO II (PID2022-141592NB-I00), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, está previsto aplicar el análisis pedoantracológico al conjunto de la Cordillera Bética, más allá de los límites histórico-geográficos del conjunto rondeño, exportándolo a relieves montañosos como Sierra Tejeda, Sierra Nevada, Sierras de Segura, Sierra de Castril, Sierra de la Sagra, Sierra de María, Sierra de Baza o, incluso, las sierras levantinas de Aitana y Tramontana.

Las evidencias paleopolínicas sugieren que el pinsapo pudo estar presente en muchas de estas montañas, una suposición que también es considerada por los MDE; sin embargo, ninguna de estas fuentes dispone de la suficiente precisión espacial como para confirmar la presencia holocena de este abeto en los citados relieves montañosos. La identificación de carbón de *Abies* en alguna –o varias– de estos territorios supondría un avance sin precedentes en la reconstrucción del área de distribución del paleoendemismo *A. pinsapo*. Contextualizada con las aportaciones procedentes de otras fuentes de información, la evidencia pedoantracológica podría convertirse en un recurso fundamental para la preservación de la diversidad biológica, algo especialmente útil cuando se trata de especies relictas en peligro de extinción como *A. pinsapo*.

GENERAL CONCLUSIONS

The application of pedoanthracological analysis in the Serranía de Ronda as a whole has provided new data on the palaeobiogeography of *Abies pinsapo* in the south of the Iberian Peninsula. Until now, the analysis of the charcoals present in natural soils of the Serranía de Ronda had confirmed the existence of a single population of *Abies* in Sierra Palmitera. This doctoral thesis project has allowed the continuation of that first attempt to understand the past dynamics of the Spanish fir, making it possible to discover three new paleopopulations in the Western Betic Cordillera. One of them is located in the Sierra del Oreganal, while the other two are confined to the geographical limits of Sierra Blanca. At the same time, the chronologies derived from the radiocarbon dating of different charcoals attributed to the genus *Abies* have confirmed the antiquity of some of the relict populations of Spanish fir that grow in their refuge areas, such as those located in Los Reales de Sierra Bermeja.

It should also be noted that, although the main object of study of the research has been *A. pinsapo*, the paleoecological study carried out during the present research has made it possible to identify other relevant taxa from a paleobiogeographical point of view. Of particular note is the identification of several charcoal fragments of *Pinus nigra/sylvestris* type in Sierra Blanca. For its part, the genus *Pinus*, without being able to specify a more specific level, has been discovered in certain areas of Sierra Blanca, Sierra de Tolox, Sierra del Oreganal, Sierra del Pinar and Sierra del Pinar. Finally, the presence of the genus *Fraxinus* has also been confirmed in Cañada de Enmedio, a locality in the Sierra de las Nieves where this taxon is not currently present.

The findings obtained with this study provide an important volume of unpublished information on the Holocene distribution of the Spanish fir in the south of the Iberian Peninsula, making a significant contribution to filling one of the most important gaps in palaeoecological knowledge affecting the whole of the Serranía de Ronda. In addition, this information represents an unprecedented advance in locating, unequivocally, those mountainous enclaves that were home to this unique fir in the past. This has been possible thanks to the high spatial precision provided by pedoanthracology, a discipline that until recently had been scarcely applied in southern Spain, and which, once again, has demonstrated its enormous usefulness when it comes to reconstructing vegetation landscapes.

The improvement of paleobiogeographical knowledge does not only include *A. pinsapo*, but also other mountain conifers equally important from an ecological and landscape point of view in the context of the Baetic System, such as *Pinus nigra/sylvestris*. Given that this taxonomic group is currently absent in the Serranía de Ronda, this discovery represents a very important contribution from a paleobiogeographical point of view, as well as confirming a wider distribution of European Black Pine forests in the western sector of the Baetic System. Thus, the discovery of ancient populations of altimontane conifers in different geographical areas of the Serranía de Ronda confirms the important role played by the mountainous reliefs of Ronda as postglacial

refuges for the aforementioned taxa. These data add to the previous information available and provide insight into the Holocene dynamics of these conifers typical of colder environments than those typically found in the Mediterranean. Both firs and pine forests, which during the Last Glacial Maximum were predictably sheltered at low altitudes in the extreme south of the Iberian Peninsula, were forced to ascend altitudinally in search of more optimal conditions for their development once the Holocene climatic improvement began. Both species found their particular ecological niche in the Serranía de Ronda. In the case of the Spanish fir, although its area of distribution has been reduced over the last millennia, it has managed to survive in this vast mountainous area up to the present day. All this despite the large number of disturbances that have historically threatened its survival, such as forest fires, indiscriminate logging and pests, among many others. The situation is visibly different with regard to European Black Pine. This species may have taken refuge in the Serranía de Ronda during the first phases of the Holocene, becoming extinct from this territory at some point during this period until it was confined to its current areas of distribution.

As a whole, the pedoanthracological record also allows us to assert the greater significance that wooded areas had in the past in the Serranía de Ronda. In addition to the conifers mentioned above, other tree genera have also been identified which are not present today in the locations where they have been found. These taxa include *Pinus* and *Fraxinus*, as well as other genera that have a low participation in the vegetation landscape of certain areas of the study area, such as *Taxus*, *Acer* and deciduous *Quercus*. Ultimately, this information not only informs of a greater extent of tree cover in the past, but also of the greater taxonomic diversity of the arboreal stratum.

The large number of radiocarbon dates obtained has revealed that forest fires have been a very common phenomenon in the Serranía de Ronda throughout the Holocene. The high temporal precision of the chronologies obtained makes it possible to determine the level of impact that fire has had on certain taxa in very specific territories. In this respect, the recurrence of these fire events may have been responsible for the local extinction of the Spanish fir in certain mountainous sectors of the Serranía de Ronda, such as the Sierra Palmitera and the Sierra del Oreganal, locations where this fir is not present today. Likewise, the data concerning these paleo-fires coincide with the conclusions obtained for other sectors of the Baetic Cordillera, revealing how forest fire activity in the Serranía de Ronda has intensified significantly during the late Holocene. This increase has become much more evident in recent centuries, coinciding with the beginning of the Contemporary Age, where humans have played a very active role in the configuration of the vegetation landscape.

Despite the results obtained, it is necessary to point out that, although this study has had a very positive impact on improving paleoecological knowledge of the Serranía de Ronda, and especially with regard to *A. pinsapo*, further research is needed. It should not be forgotten that until less than a decade ago there was hardly any information on the past distribution of the Spanish fir in the south of the Iberian Peninsula, where the species survives today. Therefore,

one of the next tasks is to find new paleopopulations for this and other singular taxa in other sectors of the Baetic System, with the aim of reaching a deeper understanding of the dynamics that the woody vegetation has experienced in the past.

The application of pedoanthracological analysis has proved to be a very effective solution for knowing the dynamics of the burned woody vegetation. In fact, its use has not only allowed us to meet the intended objectives, but has also provided complementary information of enormous paleoecological interest, further enriching the research results. Therefore, it is essential to continue supporting this methodology, and this involves continuing to expand the pedological sampling network to other unexplored sectors of the Serranía de Ronda. It is worth mentioning that work is already underway on this issue. During the last months several samplings have been carried out in different areas of the study area. Preliminary results are, once again, promising, as they are providing new paleobiogeographical information on different taxa, including *Abies*, *Pinus nigra/sylvestris* type, *Taxus baccata* and deciduous *Quercus*. Also, within the framework of the research project PALEOPINSAPO II (PID2022-141592NB-I00), funded by the Ministry of Science and Innovation, it is planned to apply the pedoanthracological analysis to the whole of the Baetic System, beyond the historical-geographical limits of Serranía de Ronda, exporting it to mountainous reliefs such as Sierra Tejada, Sierra Nevada, Sierras de Segura, Sierra de Castril, Sierra de la Sagra, Sierra de María, Sierra de Baza or even Levantine Mediterranean mountain range.

The palynological evidence suggests that the Spanish fir may have been present in many of these mountains, an assumption that is also considered by the DEMs; however, none of these sources has sufficient spatial precision to confirm the Holocene presence of this fir in the aforementioned mountainous reliefs. The identification of *Abies* charcoal in some –or several– of these territories would represent an unprecedented advance in the reconstruction of the distribution area of *A. pinsapo*. Contextualized with contributions from other sources of information, the pedoanthracological evidence could become a fundamental resource for the preservation of biological diversity, something especially useful when dealing with endangered relict species such as *A. pinsapo*.

18. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES CONSULTADAS

- Abel-Schaad, D., Alba-Sánchez, F., Pérez-Díaz, S. & López-Sáez, J.A. (2017). Praillos de Boissier mire, Tejada Natural Park (Baetic Range, southern Spain). *Grana*, 56(6), 475–47. <http://doi.org/10.1080/00173134.2017.1282977>
- Acosta, P. (1995). Las culturas del neolítico y calcolítico en Andalucía Occidental. *Espacio, Tiempo y Forma, Serie 1, Prehistoria y Arqueología*, 8, 33–80.
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Benito, B. & López-Merino, L. (2009). Historia paleoecológica y modelo de idoneidad de *Abies alba* Mill. en la Cordillera Pirenaica. *Pirineos*, 164, 93–116. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2009.v164.31>
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Benito, B., Linares, J.C., Nieto-Lugilde, D. & López-Merino, L. (2010). Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: a phytogeographic approach using fossil pollen data and species distribution models. *Diversity and Distributions*, 16(2), 214–228. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00636.x>
- Alba-Sánchez, F. & López-Sáez, J.A. (2013). Paleobiogeografía del pinsapo en la Península Ibérica durante el Cuaternario. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 33–52). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Alba-Sánchez, F., Abel-Schaad, D., López-Sáez, J.A., Sabariego Ruiz, S., Pérez-Díaz, S. & González-Hernández, A. (2018). Paleobiogeografía de *Abies* spp. y *Cedrus atlantica* en el Mediterráneo occidental (península ibérica y Marruecos). *Ecosistemas*, 27(1), 26–37. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1441>
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Abel-Schaad, D., Sabariego, S., Pérez-Díaz, S. et al. (2019). The impact of climate and land-use changes on the most southerly fir forests (*Abies pinsapo*) in Europe. *The Holocene*, 29(7), 1176–1188. <https://doi.org/10.1177/0959683619838>
- Alba-Sánchez, F., López-Sáez, J.A., Abel-Schaad, D., Sabariego, S., Pérez-Díaz, S. et al. (2021). Dinámica de las formaciones boscosas de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. en la Sierra de las Nieves durante el Holoceno Final. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 163–181). Editorial La Serranía.
- Alcalde, C., García-Amorena, I., García-Álvarez, S., García-Calvo, D., García-García, R. et al. (2006). Contribución de la paleofitogeografía a la interpretación del paisaje vegetal ibérico. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 15(1), 40–54.
- Alcaraz, F., Clemente, M., Barreña, J.A. & Álvarez Rogel, J. (1999). *Manual de teoría y práctica de Geobotánica*. Universidad de Murcia.

- Alía, R. & Martín, S. (2009). *Guía técnica para la conservación genética y utilización del pino negral (Pinus pinaster) en España*. Foresta.
- Anderson, R.S., Jiménez-Moreno, G., Carrión, J.S. & Pérez-Martínez, C. (2011). Holocene vegetation history from Laguna de Río Seco, Sierra Nevada, southern Spain. *Quat. Sci. Rev.*, 30, 1615–1629. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.03.005>
- Arista, M (1993). *Biología del pinsapo (Abies Pinsapo Boiss.)* (Tesis Doctoral). Universidad de Sevilla.
- Badal, E., Carrión, Y., Figueiral, I. & Rodríguez-Ariza, M.O. (2013). Pinares y enebrales: El paisaje solutrense en Iberia. *Espacio Tiempo y Forma Serie I, Nueva época Prehistoria y Arqueología*, 5, 259–271. <https://doi.org/10.5944/etf.i.5.5385>
- Barry, C., Ladle, R. & Moore, P. (2020). *Biogeography. An ecological and evolutionary approach*. Blackwell. Wiley-Blackwell.
- Batlloiri, E., Blanco-Moreno, J.M., Ninot, J.M., Gutiérrez, E. & Carrillo, E. (2009). Vegetation patterns at the alpine treeline ecotone: The influence of tree cover on abrupt change in species composition of alpine communities. *Journal of Vegetation Science*, 20(5), 814–825. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2009.01085.x>
- Baumann, A. & Poschlod, P. (2008). Did calcareous grasslands exist in prehistoric times? An archaeobotanical research on the surroundings of the prehistoric settlement above Kallmünz (Bavaria, Germany). En Fiorentino, G. & Magri, D. (Eds.), *Charcoals from the Past: Cultural and Palaeoenvironmental Implications Archaeopress* (pp. 25–37). Archaeopress.
- Beato-Bergua, S. (2018). *El patrimonio natural de la Sierra del Aramo (Montaña Central Asturiana) y la evolución de su paisaje* (Tesis Doctoral). Universidad de Oviedo.
- Beato-Bergua, S., Poblete-Piedrabuena, M.A., & Cunill-Artigas, R. (2019). *Taxus baccata* en la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 81, 1–30. <https://doi.org/10.21138/bage.2772>
- Becerra, M. (2006). *Ordenación y aprovechamiento de los pinsapares rondeños durante el siglo XIX. La memoria de Antonio Laýnez*. Editorial La Serranía.
- Bejarano-Palma, R. & Rubio-Recio, J.M. (1999). Biogeografía: una revisión sobre su papel, su trayectoria y sus contenidos. *Estudios Geográficos*, 60(237), 545–578.
- Berger, J.F. & Thiébault, S. (2002). The study and significance of charcoal as an indicator of ancient fires: an application to the middle Rhone valley (France). En Thiébault, S. (Ed.), *Charcoal Analysis. Methodological Approaches, Palaeoecological Results and Wood Uses* (pp. 25–41). Archaeopress.

- Bertran, P., Fabre, L., Franc, O., Limondin-Lozouet, N. & Thiébaud, S. (1998). Évolution d'un versant au cours de l'Holocène à Vaise (France). *Géographie physique et quaternaire*, 52(1), 69–90. <https://doi.org/10.7202/004769ar>
- Blanca-López, G., Cabezudo, B., Hernández-Bermejo, J.E., Herrera-Maliani, C.M., Muñoz-Álvarez, J. (1999). *Libro Rojo de la flora silvestre amenazada de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Blanco, E., Casado, M.A., Costa, M., Escribano, R., García-Antón, M. et al. (1999). *Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica*. Editorial Planeta.
- Blanes, M.C., Viñepla, B., Merino, J. & Carreira, J.A. (2013). Nutritional status of *Abies pinsapo* forests along a nitrogen deposition gradient: do C/N/P stoichiometric shifts modify photosynthetic nutrient use efficiency? *Oecologia*, 171, 797–808. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2454-1>
- Bodí, M.B., Cerdà, A., Mataix-Solera, J. & Doerr, S.H. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 58, 33–55. <https://doi.org/10.21138/bage.2058>
- Bond, W.J. & Keeley, J.E. (2005). Fire as a global “herbivore”: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 20, 387–394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>
- Bordino, J. (2022, 28 de enero). El árbol más grande del mundo. *Ecología Verde*. Recuperado de <https://www.ecologiaverde.com/el-arbol-mas-grande-del-mundo-3730.html>
- Boticario, F.J. (2011). La Revolución Neolítica y su influencia en los paisajes forestales en las áreas montañosas de Cantabria. En Boticario, F.J. & Rey van den Bercken, E. (Coord.), *La evolución del paisaje vegetal y el uso del fuego en la Cordillera Cantábrica* (pp. 91–108). Fundación Patrimonio Natural de Castilla y León.
- Burjachs, F. & Expósito, I. (2015). Charcoal and pollen analysis: Examples of Holocene fire dynamics in Mediterranean Iberian Peninsula. *CATENA*, 135, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.006>
- Cabezudo, B., Talavera, S., Blanca-López, G., Salazar, C., Cueto, M. et al. (2005). *Lista roja de la flora vascular de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Calonge, A., Caus, E. & García, J. (2001). Los foraminíferos: presente y pasado. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 9(2), 144–150.
- Camuera, J., Ramos, M.J., Jiménez-Moreno, G., López-Sáez, J.A. & Alba-Sánchez, F. (2017). El Padul, un enclave natural y un registro sedimentario excepcionales. Sus humedales y turberas. *Revista PH*, 91, 72–80. <https://doi.org/10.33349/2017.0.3916>

- Capel-Molina, J.J. (2000). *El clima de la península ibérica*. Editorial Ariel.
- Carcaillet, C. (1998). A spatially precise study of fires, climate and human impact within the Maurienne valley, North French Alps. *Journal of Ecology*, 86(3), 384–396. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1998.00267.x>
- Carcaillet, C. (2001). Are Holocene wood charcoal fragments stratified in alpine and subalpine soils? Evidence from the European Alps. *The Holocene*, 11(2), 231–242. <https://doi.org/10.1191/095968301674071040>
- Carcaillet, C. & Talon, B. (1996). Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons de bois dans les sols: exemple de quelques sols des Alps. *Géographie Physique et Quaternaire*, 50(2), 233–244. <https://doi.org/10.7202/033091ar>
- Carcaillet, C. & Talon, B. (2001). Soil carbon sequestration by Holocene fires inferred from soil charcoal in the dry French Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 33(3), 282–288. <https://doi.org/10.1080/15230430.2001.12003432>
- Carnelli, A., Theurillat, J.P., Thinon, M., Vadi, G. & Talon, B. (2004). Past uppermost tree limit in the Central European Alps (Switzerland) based on soil and soil charcoal. *The Holocene*, 14(3), 393–405. <https://doi.org/10.1191/0959683604hl715rp>
- Carracedo-Martín, V. (2015). *Incendios forestales y gestión del fuego en Cantabria* (Tesis Doctoral). Universidad de Cantabria.
- Carracedo-Martín, V., Cunill-Artigas, R., García-Codrón, J.C., Pèlachs-Mañosa, A., Pérez-Obiol, R. & Soriano-López, J.M. (2017). Fuentes para la geografía histórica de los incendios forestales. Algunas consideraciones metodológicas. *Cuadernos Geográficos*, 56(3), 66–89.
- Carrión, J.S. (2012). *Paleoflora y Paleovegetación de la Península Ibérica e Islas Baleares: Plioceno-Cuaternario*. Ministerio de Economía y Competitividad, Universidad de Murcia y Fundación Séneca.
- Carrión, J.S. (2022). *Paleoflora y Paleovegetación Ibérica*. Ministerio de Ciencia e Innovación y Fundación Séneca.
- Carrión, J.S., Riquelme, J.A., Navarro, C. & Munuera, M. (2001). Pollen in hyaena coprolites reflects late glacial landscape in southern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 176(1-4), 193–205. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(01\)00338-8](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(01)00338-8)
- Carrión, J.S., Sánchez-Gómez, P., Mota, J.F., Yll, E.I. & Chaín, C. (2003). Holocene vegetation dynamics, fire and grazing in the Sierra de Gádor, southern Spain. *The Holocene*, 13(6), 839–849. <https://doi.org/10.1191/0959683603hl662rp>
- Carrión, J.S., Yll, E.I., Willis, K.J. & Sánchez-Gómez, P. (2004). Holocene forest history of the Eastern plateaux in the Segura Mountains (Murcia, southeastern Spain). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 132(3-4), 219–236. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2004.07.002>

- Carrión, J.S., Fuentes, N., González-Sampériz, P., Quirante, L.S., Finlayson, J.C. et al. (2007). Holocene environmental change in a montane region of southern Europe with a long history of human settlement. *Quaternary Science Reviews*, 26(11-12), 1455–1475. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.03.013>
- Carrión, J.S., Finlayson, C., Fernández, S., Finlayson, G., Allué, E. et al. (2008). A coastal reservoir of biodiversity for Upper Pleistocene human populations: Palaeoecological investigations in Gorham's Cave (Gibraltar) in the context of the Iberian Peninsula. *Quaternary Sciences Reviews*, 27(23-24), 2118–2135. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.08.016>
- Carrión, J.S., Fernández, S., González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Badal, E. et al. (2010). Expected trends and surprises in the Lateglacial and Holocene vegetation history of the Iberian Peninsula and Balearic Islands. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 162(3), 458–475. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2009.12.007>
- Castaño-Aguilar, J.M. (2021). Poblamiento antiguo en los bosques de la Serranía de Ronda. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 59–75). Editorial La Serranía.
- Castillo, J.A. (2002). *El Valle Del Genal. Paisajes y Formas de Vida Campesinas*. Centro de Ediciones de la Diputación Provincial de Málaga.
- Castro, M., Morla, C. & Sainz, H. (2005). *Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica*. Editorial Planeta.
- Catalan-Bachiller, G. (1991). *Las Regiones de procedencia de Pinus sylvestris L. y Pinus nigra Arn. subsp. salzmannii (Dunal) Franco en España*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza.
- Chen, W., Ding, H., Jiangrong, L., Kang, C. & Wang, H. (2022). Alpine treelines as ecological indicators of global climate change: Who has studied? What has been studied? *Ecological Informatics*, 70, 101691. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101691>
- Cortés-Sánchez, M., Morales-Muñiz, A., Simón-Vallejo, M.D., Bergadà-Zapata, M.M., Delgado-Huertas, A. et al. (2008). Palaeoenvironmental and cultural dynamics of the coast of Málaga (Andalusia, Spain) during the Upper Pleistocene and early Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 27(23-24), 2176–2193. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.03.010>
- Cortés-Sánchez, M., Simón-Vallejo, M.D., Riquelme-Cantal, J.A., Peña-Chocarro, L., Guibaja-Bao, J.F. et al. (2010). El Neolítico en la costa de Málaga (España): viejos y nuevos datos para su contextualización en el proceso de neolitización del sur de la Península Ibérica. En Guibaja-Bao, J.F. & Carvalho, A.F. (Eds.), *Os últimos caçadores-recolectores e as primeiras comunidades produtoras do sul da Península Ibérica e do norte de Marrocos* (pp. 151–162). Universidad de Sevilla.

- Cunill, R. (2010). *Estudi interdisciplinari de l'evolució del límit superior del bosc durant el període holocènic a la zona de Plaús de Boldís-Montarenyo, Pirineu central català* (Tesis Doctoral). Universidad Autònoma de Barcelona.
- Cunill, R., Pèlach, A. & Soriano, J.M. (2008). The consequences on landscape of new land uses in the upper forest line. En Prados, M.J. (Ed.), *Naturbanization: New identities and processes for rural-natural areas*. CRC Press/Balkema.
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlach, A. & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(4–5), 373–384. <https://doi.org/10.1007/s00334-011-0342-y>
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlach, A., Rodríguez, J.M. et al. (2013). Holocene high-altitude vegetation dynamics in the Pyrenees: a pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach. *Quaternary International*, 289, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.04.041>
- Cunill, R., Pèlach, A., Soriano, J.M., Pérez-Obiol, R., Nadal, J. et al. (2018). Evolución paleobiogeográfica del abeto (*Abies alba*) en su límite meridional ibérico (Parc Natural del Montseny, Girona-Barcelona). En Gosálbez, R.U., Díaz, M.C., García, J.L., Serrano de la Cruz, M.A. & Jerez, O. (Eds.), *Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación. Aportaciones desde la Biogeografía* (pp. 860–868). Almad, Ediciones de Castilla-La Mancha.
- Delhon, C., Thiébaud, S. & Berger, J.F. (2009). Environment and landscape management during the Middle Neolithic in Southern France: evidence for agro-sylvo-pastoral systems in the Middle Rhone Valley. *Quaternary International*, 200(1-2), 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.05.008>
- Dering, M., Sękiewicz, K., Boratyńska, K., Litkowiec, M., Iszkuło, G. et al. (2014). Genetic diversity and inter-specific relations of western Mediterranean relic *Abies* taxa as compared to the Iberian *A. alba*. *Flora*, 209(7), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2014.03.011>
- De Vita, P., Serrano, M.S., Luchi, N., Capretti, P., Trapero, A. et al. (2010). Susceptibility of *Abies pinsapo* and its tree cohort species to *Heterobasidion abietinum*. *Forest Pathology*, 40(2), 129–132. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2009.00619.x>
- Di Pasquale, G., Marziano, M., Impagliazzo, S., Lubritto, C., Natale, A. et al. (2008). The Holocene treeline in the northern Andes (Ecuador): first evidence from soil charcoal. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259(1), 17–34. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.12.016>
- Di Pasquale, G., Impagliazzo, S., Lubritto, C., Marziano, M., Passariello, I. et al. (2010). Soil charcoal analysis as a climato-stratigraphical tool: the key case of Cordillera Real, northern

- Andes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 268(7-8), 1088–1090. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.10.105>
- Dupre, M. (1979). *Breve manual de análisis polínico*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Valencia.
- EUFORGEN (2022). Species. Recuperado de <http://www.euforgen.org/especies>
- EUROPEAN POLLEN DATABASE (2023). Data. Recuperado de <http://www.europeanpollendatabase.net/index.php>
- Farjalla, V., Coutinho, R., Gómez-Aparicio, L., Navarrete, S., Aliny, P.F. et al. (2018). Pérdida de biodiversidad: causas y consecuencias para la humanidad. *Cambio Global. Una Mirada desde Iberoamérica*, 89–110.
- Favilli, F., Cherubini, P., Collenberg, M., Egli, M., Sartori, G. et al. (2010). Charcoal fragments of Alpine soils as an indicator of landscape evolution during the Holocene in Val di Sole (Trentino, Italy). *The Holocene*, 20(1), 67–79. <https://doi.org/10.1177/095968360934>
- Fernández, S., Fuentes, N., Carrión, J.S., González-Sampériz, P., Montoya, M. et al. (2007). The Holocene and Upper Pleistocene pollen sequence of Carihuela Cave, southern Spain. *Geobios*, 40(1), 75–90. <https://doi.org/10.1016/j.geobios.2006.01.004>
- Fernández, S., Carrión, J.S., Ochando, J., González-Sampériz, P., Munuera, M. et al. (2021). New palynological data from the Late Pleistocene glacial refugium of South-West Iberia: The case of Doñana. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 290, 104431. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2021.104431>
- Fernández-Cancio, A., Navarro-Cerrillo, R., Fernández-Fernández, R., Gil-Hernández, P., Manrique-Menéndez, E. et al. (2007). Climate classification of *Abies pinsapo* Boiss. forests in Southern Spain. *Investigacion Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 163, 222–229.
- Figueiral, I. & Carcaillet, C. (2005). A review of Late Pleistocene and Holocene biogeography of highland Mediterranean pines (*Pinus* type *sylvestris*) in Portugal, based on wood charcoal. *Quaternary Science Reviews*, 24(24-25), 2466–2476. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.02.004>
- Finlayson, G., Finlayson, C., Giles, F., Rodríguez-Vidal, J., Carrión, J.S. et al. (2008). Caves as archives of ecological and climatic changes in the Pleistocene – The case of Gorham's cave, Gibraltar. *Quaternary International*, 181(1), 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.01.009>
- Florschütz, F., Menéndez-Amor, J. & Wijmstra, T.A. (1971). Palynology of a thick Quaternary successions in southern Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 10(4), 233–264. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(71\)90049-6](https://doi.org/10.1016/0031-0182(71)90049-6)

- Frelich, L. (2020). Boreal and taiga biome. *Encyclopedia of the World's Biomes*, 103–115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11926-8>
- Galán de Mera, A., Pérez-Latorre, A.V. & Vicente, J.A. (2003). Relaciones fitogeográficas entre el suroccidente de la península ibérica y el noroeste de África. Una propuesta de sectorización. *Lagascalia*, 23(1), 27–52.
- García-Álvarez, S., Bal, M.C., Allée, P., García-Amorena, I. & Rubiales, J.M. (2017). Holocene treeline history of a high-mountain landscape inferred from soil charcoal: The case of Sierra de Gredos (Iberian Central System, SW Europe). *Quaternary International*, 457(1), 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.04.019>
- García-Esteban, L., Simón, C., García-Fernández, F., de Palacios, P., Martín-Sampedro, R. et al. (2015). Juvenile and mature wood of *Abies pinsapo* Boissier sorption and thermodynamic properties. *Wood Science and Technology*, 49, 725–738. <https://doi.org/10.1007/s00226-015-0730-z>
- García-Quiroga, F. & Abad-Soria, J. (2014). Los corredores ecológicos y su importancia ambiental. *Observatorio medioambiental*, 17, 253–298. https://doi.org/10.5209/rev_OBMD.2014.v17.47194
- Gavira, O. (2006). Análisis de un corredor florístico entre los Parques Naturales Sierra de Grazalema y Sierra de las Nieves (Cádiz y Málaga, España). *Anales de Biología*, 28, 45–72.
- Gil, A. (2002). *Simón de Rojas Clemente. Viaje a Andalucía. Historia Natural del Reino de Granada*. GBG Editora.
- Gil-Romera, G., Carrión, J.S., Pausas, J.G., Sevilla-Callejo, M., Lamb, H.F. et al. (2010). Holocene fire activity and vegetation response in South-Eastern Iberia. *Quaternary Science Reviews*, 29(9-10), 1082–1092. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.01.006>
- GLOBAL PALEOFIRE DATABASE (2022). All scores (and sites). Recuperado de <https://www.paleofire.org/index.php>
- Gómez-Mercado, F. (2011). Vegetación y flora de la Sierra de Cazorla. *Guineana*, 17, 1–481.
- Gómez-Moreno, M.L. (2012). La Serranía de Ronda: configuración física y articulación del poblamiento. *Takurunna*, 2, 121–150.
- Gómez-Zotano, J. (2003). El papel de los espacios montañosos como traspáis del litoral mediterráneo andaluz: el caso de Sierra Bermeja (provincia de Málaga). *Cuadernos Geográficos*, 33, 183–187.
- Gómez-Zotano (2004). *El papel de los espacios montañosos como traspáis del litoral mediterráneo andaluz, el caso de Sierra Bermeja (provincia de Málaga)* (Tesis Doctoral). Universidad de Granada.

- Gómez-Zotano, J. (2006). *Naturaleza y paisaje en la Costa del Sol Occidental*. Servicio de Publicaciones Centro de Ediciones de la Diputación de Málaga.
- Gómez-Zotano, J., Román-Requena, F., Hidalgo-Triana, N. & Pérez-Latorre, A.V. (2014). Biodiversidad y valores de conservación de los ecosistemas serpentínicos en España: Sierra Bermeja (provincia de Málaga). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 65, 187–206. <https://doi.org/10.21138/bage.1749>
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Martínez-Ibarra, E. & Cunill-Artigas, R. (2015). Descubrimiento y caracterización de una cuenca endorreica en la cumbre de Sierra Bermeja (provincia de Málaga). En De la Riva, J., Ibarra, P., Montorio, R. & Rodrigues, M. (Eds.), *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación* (pp. 1629–1638). Universidad de Zaragoza-AGE.
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Martínez-Ibarra, E. (2017). Descubrimiento y caracterización geográfica de una depresión ultramáfica en Sierra Bermeja: nuevos datos geomorfoedáficos, fitogeográficos y paleoecológicos. *Pirineos*, 172. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172001>
- Gómez-Zotano, J., Cunill-Artigas, R., Olmedo-Cobo, J.A. & Arias-García, J. (2018). Análisis pedoantracológico y propuesta de conectividad ecológica de *Abies pinsapo* en la Red Natura 2000 de Sierra Bermeja. En Gosálbez, R.U., Díaz, M.C., García, J.L., Serrano de la Cruz, M.A. & Jerez, O. (Eds.), *Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación. Aportaciones desde la Biogeografía* (pp. 635–645). Almad, Ediciones de Castilla La Mancha.
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Pardo-Martínez, R. (2020). Aproximación geográfica a la Sierra Blanca de Igualeja (Serranía de Ronda). *Takurunna*, 8-9, 25–50.
- Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (2021). *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal*. Editorial La Serranía.
- Gómez-Zotano, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Cunill, R. (2021). Análisis pedoantracológico y propuesta de conectividad ecológico de *Abies pinsapo* Clemente ex Boiss. en la Red Natura 2000 de Sierra Bermeja. En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda. Una perspectiva espacio-temporal* (pp. 237–252). Editorial La Serranía.
- González-Hernández, A. (2021). *Biogeografía y conservación de dos especies de la flora relictas del Mediterráneo Occidental: Abies pinsapo Boiss. y Cedrus atlantica (Endl.) Carrière* (Tesis Doctoral). Universidad de Granada.
- González-Hidalgo, N. (2009). Procesos de neolitización: el caso de la media montaña subbética occidental: la Depresión de Ronda. *Arqueología y Territorio*, 6, 23–38.

- Gutiérrez-Hernández, O. (2018). Impacto del calentamiento global en la distribución y supervivencia del pinsapo (Serranía de Ronda). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 76, 504–549. <https://doi.org/10.21138/bage.2532>
- Gutiérrez-Hernández, O., Cámara-Artigas, R. & García, L.V. (2017). Nicho ecológico y distribución geográfica del pinsapo (*Abies pinsapo*. Boiss). *Takurinna*, 6-7.
- Guzmán, J.R., Catalina, M.A., Navarro-Cerrillo, R.F., López-Quintanilla, J. & Sánchez, R. (2013). Los paisajes del pinsapo a través del tiempo. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp. 111–158). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Harrison, S.P., Villegas-Díaz, R., Cruz-Silva, E., Gallagher, D., Kesner, D. et al. (2021). The Reading Palaeofire database: an expanded global resource to document changes in fire regimes from sedimentary charcoal records. *Earth System Science Data*, 14(3), 1109–1124. <https://doi.org/10.17864/1947.319>
- Herrera, J., Arista, M. & Talavera, S. (2001). *Libro Rojo de la flora silvestre amenazada de Andalucía. Tomo I: Especies en peligro de extinción*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Herrero, A. & Zavala, M.A. (2015). *Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Hidalgo-Triana, N. & Pérez-Latorre, A.V. (2017). Los serpentínófitos suribéricos. Las joyas botánicas de Sierra Bermeja. *Takurinna*, 6-7, 107–120.
- Hilty, J., Worboys, G.L., Keeley, A., Woodley, S., Lausche, B. et al. (2020). Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors. *Best Practice Protected Area Guidelines Series*, 30. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.30.en>
- Islebe, G. (1999). La paleoecología: bases y su aplicación. *Foresta Veracruzana*, 1(2), 47–50.
- Jacquot, C., Robin, A.M. & Bedeneau, M. (1973). Reconstitution d'un ancien peuplement forestier en forêt de Fontainebleau par l'étude anatomique de charbons de bois et leur datation par le 14C. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 120(5-6), 231–233. <https://doi.org/10.1080/00378941.1973.10839161>
- Jalut, G., Esteban, A., Bonnet, L., Gauquelin, T. & Fontugne, M. (2000). Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 160(3-4), 255–290. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00075-4)

- Jiménez-Moreno, G. & Anderson, R.S. (2012). Holocene vegetation and climate change recorded in alpine bog sediments from the Borreguiles de la Virgen, Sierra Nevada, southern Spain. *Quaternary Research*, 77(1), 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.09.006>
- Johston, R. (7 de julio de 2023). Geography. *Encyclopaedia Britannica*. Recuperado de <https://www.britannica.com/science/geography/The-development-of-academic-geography-in-the-United-Kingdom>
- Junta de Andalucía (1996-1999). *Bases para el manejo y conservación del pinsapar del Parque Natural Sierra de Grazalema*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía (2003). *Programa de Actuaciones para la Conservación del Pinsapo*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía (2008). *Proyecto de actuaciones de mejoras y recuperación para Abies pinsapo en las provincias de Cádiz y Málaga*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Junta de Andalucía (15 de noviembre de 2010). Evolución de la cobertura de pinsapo (*Abies pinsapo*) entre los años 1956 y 2007. *REDIAM*. Recuperado de <https://portalrediam.cica.es/geonetwork/srv/api/records/d67ff263-dc7d-4e5c-84d1-fcbfe34c1483>
- Junta de Andalucía (2011). *Programa de Actuación del Plan de Recuperación del Pinsapo (2015–2019)*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Keeley, J.E., Bond, W.J. Bradstock, R.A. Pausas, J.G. & Rundel, P.W. (2012). *Fire in Mediterranean Ecosystems: ecology, evolution and management*. Cambridge University Press.
- Kimball, K. & Weihrauch, D. (2000). Alpine Vegetation Communities and the Alpine-Treeline Ecotone Boundary in New England as Biomonitors for Climate Change. En McCool, S., Cole, D., Borrie, W. & Loughlin, J. (Eds.), *Wilderness science in a time of change conference* (pp. 93–101). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Ladle, R.J. & R.J. Whittaker (2011). *Conservation Biogeography*. Wiley-Blackwell.
- Lefèvre, F. (2004). Human impacts on forest genetic resources in the temperate zone: an updated review. *Forest Ecology and Management*, 197(1-3), 257–271. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.017>
- Linares, J.C. (2011). Biogeography and evolution of *Abies* (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: the roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 38(4), 619–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02458.x>

- Linares, J.C. & Carreira, J. (2006). El pinsapo, abeto endémico andaluz. O, ¿Qué hace un tipo como tú en un sitio como éste? *Ecosistemas*, 15(3), 171–191.
- Linares, J.C., Delgado-Huertas, A., Camarero, J.J., Merino, J. & Carreira, J.A. (2009). Competition and drought limit the response of water-use efficiency to rising atmospheric carbon dioxide in the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *Oecologia*, 161(3), 611–624. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1409-7>
- Linares, J.C., Camarero, J.J. & Carreira, J.A. (2010). Competition modulates the adaptation capacity of forests to climatic stress: insights from recent growth decline and death in relict stands of the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *Journal of Ecology*, 98(3), 592–603. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01645.x>
- Linares, J.C., Carreira, J.A. & Ochoa, V. (2011). Human impacts drive forest structure and diversity. Insights from Mediterranean mountain forest dominated by *Abies pinsapo* (Boiss.). *European Journal of Forest Research*, 130, 533–542. <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0441-9>
- Linares, J.C., Ochoa, M.V. & Carreira, J.A. (2013). Efecto de entresacas de diversificación estructural. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los Pinsapares en Andalucía: Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp 465–479). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Lindskoug, H. & Villafañez, E. (2020). Fire ecology, past landscapes and human interaction: contributions from pedoanthracology, Balcosna Valley, Catamarca, North-western Argentina. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 12(154). <https://doi.org/10.1007/s12520-020-01108-z>
- Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., Alpert, P., Artale, V. et al. (2006). The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 4, 1–26. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80003-0)
- Liu, M., Shen, Y., González-Sampérez, P., Gil-Romera, G., ter Braak, C.J.F. et al. (2023). Holocene climates of the Iberian Peninsula: pollen-based reconstructions of changes in the west–east gradient of temperature and moisture. *Climate of the Past*, 19(4), 803–834. <https://doi.org/10.5194/cp-19-803-2023>
- López-García, P. & López-Sáez, J.A. (1994). El paisaje andaluz en la Prehistoria: datos paleopalinológicos. *Revista Española de Micropaleontología*, 26(2), 49–59.
- López-Quintanilla, J. (2013). *Los pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): conservación y sostenibilidad en el siglo XXI*. Universidad de Córdoba.
- López-Sáez, J.A., López-García, P. & Cortés-Sánchez, M. (2007). Paleovegetación del Cuaternario reciente: estudio arqueopalinológico. En Cortés-Sánchez, M. (Ed.), *Cueva Bajondillo (Torremolinos). Secuencia cronocultural y paleoambiental del Cuaternario*

- reciente en la Bahía de Málaga* (pp. 139–158). Centro de Ediciones de la Diputación Provincial de Málaga.
- López-Sáez, J.A., López-Merino, L. & Pérez-Díaz, S. (2008). Historia de la vegetación: una aproximación arqueopalinológica. *Antiquitas*, 20, 41–47.
- López-Tirado, J. & Hidalgo, P. (2014). A high resolution predictive model for relict trees in the Mediterranean-mountain forests (*Pinus sylvestris* L., *P. nigra* Arnold and *Abies pinsapo* Boiss.) from the south of Spain: A reliable management tool for reforestation. *Forest Ecology and Management*, 330, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.009>
- Manzano, S., Carrión, J.S., López-Merino, L., Jiménez-Moreno, G., Toney, J. et al. (2019). A palaeoecological approach to understanding the past and present of Sierra Nevada, a Southwestern European biodiversity hotspot. *Global and Planetary Change*, 175, 238–250. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.02.006>
- Marañona, T. (1997). *El bosque mediterráneo*. Digital CSIC.
- Martínez-Murillo, J., Remond, R., Hueso-González, P. & Ruiz-Sinoga, J.D. (2016). Resiliencia de la cubierta vegetal en un área de montaña mediterránea afectada por el fuego: el caso del incendio de Río Verde (provincia de Málaga, sur de España). *Pirineos*, 171, e024. <http://doi.org/10.3989/pirineos.2016.171008>
- Martínez-Navarro, B. (1993). *El Hombre de Orce: historia de un descubrimiento*. Proyecto Sur de Ediciones.
- Mauri, A., Davis, A.S., Kaplan, O. & Collins, P. (2015). The climate of Europe during the Holocene: a gridded pollen-based reconstruction and its multi-proxy evaluation. *Quaternary Science Reviews*, 112, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.01.013>
- Mayhew, S. (2010). *Dictionary of Geography*. Oxford University Press.
- Meave, J. & Martínez, A.L. (2002). La biogeografía, disciplina integradora de las ciencias biológicas. *Revista de la Universidad de México*, 595, 66–71.
- Menéndez-Amor, J. & Florschütz, F. (1962). Un aspect de la végétation en Espagne méridionale durant la dernière glaciation et Holocene. *Geologie en Mijnbouw*, 41, 131–134.
- Middlemiss, F.A. (1979). Paleobiogeography. En Finkl, C.W. (Ed.), *Paleontology. Encyclopedia of Earth Science*. Springer.
- Miller, J. (2010). Species Distribution Modeling. *Geography Compass*, 4(6), 490–509. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00351.x>
- Morgado-Rodríguez, A. & Martínez-Fernández, G. (2005). Desarrollo local y diversificación regional del Neolítico de las cordilleras béticas: la Comarca del Guadalteba (Málaga). En

- Ontañón, R., García-Moncó, C. & Arias-Cabal, P. (Eds.), *Actas del III Congreso del Neolítico en la Península Ibérica* (pp. 1045–1055). Universidad de Cantabria.
- Morla, C., Franco-Múgica, F., Maldonado-Ruiz, J., Gómez-Manzaneque, F. & Postigo, J.M. (2000). El papel de los pinares en la vegetación holocena de la península Ibérica. *Ecología*, 14, 61–78.
- Moser, D., Di Pasquale, G., Scarciglia, F. & Nelle, O. (2017). Holocene mountain forest changes in central Mediterranean: Soil charcoal data from the Sila Massif (Calabria, southern Italy). *Quaternary International*, 457, 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.01.042>
- Múgica de la Guerra, M., de Lucio Fernández, J.V., Martínez-Alandi, C., Sastre-Olmos, P., Atauri-Mezquida, J.A. et al. (2002). *Integración territorial de espacios naturales protegidos y conectividad ecológica en paisajes mediterráneos*. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Muller, P. (1979). *Introducción a la zoogeografía*. Blume.
- Naranjo-Barea, A.J., Rodrigo-Comino, J. & Senciales-González, J.M. (2017). Estimación del efecto *Venturi* como factor desencadenante de la pluviometría en la Sierra de Grazalema. *Pirineos*, 172, e033. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2017.172008>
- Navarro-Cerrillo, R.M., Fernández, L., Blanco-Oyonarte, P., Calzado, C., López-Quintanilla, J. et al. (2006). Physiography potentiality of Spanish fir forests (*Abies pinsapo* Boiss.) in Andalucía. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 15, 137–152. <https://doi.org/10.5424/srf/200615S1-00988>
- Navarro-Cerrillo, R.M., López-Quintanilla, J., Blanco-Oyonarte, P., Sánchez-Salguero, R., Guzmán-Álvarez, J.R. et al. (2013). Distribución actual y potencial de pinsapo (*Abies pinsapo* Boiss). En Lopez-Quintanilla, J. (Ed.), *Los pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.): conservación y sostenibilidad en el siglo XXI* (pp.159–186). Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- Naveh, Z. (1974). Effects of fire in the Mediterranean Region. En Kozlowski, T.T. (Ed.), *Fire in Ecosystems* (pp. 401–434). Academic Press.
- Naveh, Z. (1975). The evolutionary significance of fire in the Mediterranean Region. *Vegetatio*, 29(3), 199–208. <https://doi.org/10.1007/BF02390011>
- Naveh, Z. (1991). The role of fire in Mediterranean vegetation. *Botanika Chronika*, 10, 386–405.
- Nelle, O. & Schmidgall, J. (2003). Der Beitrag der Paläobotanik zur Landschaftsge-schichte von Karstgebieten am Beispiel der vorgeschichtlichen Höhensiedlung auf dem Schloßberg bei Kallmünz (Südöstliche Frankenalb). *Eiszeitalter und Gegenwart*, 53(1), 55–73. <https://doi.org/10.23689/fidgeo-1138>

- Nelle, O., Talon, B. & Robin, B. (2013). Pedoanthracology: Analysing soil charcoal to study Holocene palaeoenvironments. *Quaternary International*, 289, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.024>
- Nogués, D. (2003). El estudio de la distribución espacial de la biodiversidad: conceptos y métodos. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 29, 67–82. <https://doi.org/10.18172/cig.1059>
- Novák, J., Petr, L. & Treml, V. (2010). Late-Holocene human-induced changes to the extent of alpine areas in the East Sudetes, Central Europe. *The Holocene*, 20(6), 895–905. <https://doi.org/10.1177/0959683610365938>
- Novák, J., Sádlo, J. & Svobodová-Svitavská, H. (2012). Unusual vegetation stability in a lowland pine forest area (Doksy region, Czech Republic). *The Holocene*, 22(8), 947–955. <https://doi.org/10.1177/0959683611434219>
- Olmedo-Cobo, J.A. & Gómez-Zotano, J. (2016). Los climas de la Serranía de Ronda: una propuesta de clasificación. *Takurunna*, 6-7, 23–58.
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2016). Nuevos datos paleoecológicos de *Abies* ssp. en el sur de España a partir del análisis pedoantracológico en Sierra Bermeja. En Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), *Avances en Biogeografía: áreas de distribución: entre puentes y barreras* (pp. 582–591). Editorial Universidad de Granada-Tundra Ediciones.
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Martínez-Ibarra, E. & Gómez-Zotano, J. (2017). Paleoecología de *Abies* sp. en Sierra Bermeja (sur de la península ibérica) durante el Holoceno medio a partir del análisis pedoantracológico. *Bosque*, 38(2), 259–270. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200004>
- Olmedo-Cobo, J.A., Gómez-Zotano, J., Cunill-Artigas, R. & Serrano-Montes, J.L. (2018). Controversia latifolias-coníferas sobre sustratos ultramáficos: una resolución desde las fuentes históricas y la pedoantracología. En Gosálbez, R.U., Díaz, M.C., García, J.L., Serrano de la Cruz, M.A. & Jerez, O. (Eds.), *Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación. Aportaciones desde la Biogeografía* (pp. 242–253). Almud, Ediciones de Castilla La Mancha.
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R., Gómez-Zotano, J. & Pardo-Martínez, R. (2019a). Aportaciones del análisis pedoantracológico al conocimiento paleoecológico de *Pinus pinaster* en el sur de España: el caso de Sierra Bermeja. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 1–34. <https://doi.org/10.21138/bage.2667>
- Olmedo-Cobo, J.A., Cunill-Artigas, R. & Gómez-Zotano, J. (2019b). The native status of *Pinus pinaster* on serpentine soils: charcoal analysis and palaeoenvironmental history in Sierra

- Bermeja (southern Iberian Peninsula, Spain). *Vegetation History and Archaeobotany*, 28, 417–432. <https://doi.org/10.1007/s00334-018-0701-z>
- Otero, J.C. (2020). *La geografía de la vida: la biogeografía*. Editorial Aula Magna.
- Pausas, J.G. (2004). La recurrencia de incendios en el monte mediterráneo. En Vallejo, V.R. & Alloza, J.A. (Eds.), *Avances en el estudio de la gestión del monte mediterráneo* (pp. 47–64). Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo.
- Pearson, R., Thuiller, W., Araújo, M., Martínez-Meyer, E., Brotons, L. et al. (2006). Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography*, 33(10), 1704–1711. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01460.x>
- Pèlach, A., Pérez-Obiol, R., Soriano, J.M. & Pérez-Haase, A. (2015). Dinàmica de la vegetació, contaminació ambiental i incendis durant els últims 10.000 anys a la Bassa Nera (Val d'Aran). En Generalitat de Catalunya (Ed.), *La investigació al Parc Nacional d'Aigüestortes i Estany de Sant Maurici* (pp. 75–87). Generalitat de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat.
- Pèlach, A., García-Codron, J.C., Soriano-López, J.M., Pérez-Obiol, R. & Catalán-Aguilar, J. (2016). Papel de los incendios en las dinámicas forestales del Norte de la Península Ibérica durante el Holoceno. En: Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), *Avances en Biogeografía. Áreas de distribución: entre puentes y barreras* (pp. 553–562). Editorial Universidad de Granada y Tundra Ediciones.
- Pèlach, A., Pérez-Obiol, R., Soriano, J.M., Cunill, R., Bal, M.C. et al. (2017). The Role of Environmental Geohistory in High-Mountain Landscape Conservation. En Catalan, J., Ninot, J. & Aniz, M. (Eds.), *High Mountain Conservation in a Changing World. Advances in Global Change Research* (pp. 107–129). Springer.
- Pérez-Latorre, A.V. (1997). *La vegetación del Valle del Genal y su conservación*. Consejería de Educación y Ciencia de la Junta de Andalucía.
- Pérez-Latorre, A.V., Hidalgo-Triana, N., Cabezudo, B. & Martos-Martín, J. (2019). *Mapa Biogeográfico de la provincia de Málaga (España)*. Universidad de Málaga y Diputación de Málaga.
- Pérez-Latorre, A.V., Hidalgo-Triana, N. & Cabezudo, B. (2021). Biogeografía y bosques de la Serranía de Ronda (Cádiz-Málaga-Sevilla). En Gómez-Zotano, J. & Olmedo-Cobo, J.A. (Eds.), *Los bosques de la Serranía de Ronda: una perspectiva espacio-temporal* (pp.11–58). Editorial La Serranía.
- Pérez-Obiol, R., Bal, M.C., Pèlach, A., Cunill, R. & Soriano, J.M. (2012). Vegetation dynamics and anthropogenically forced changes in the Estanilles peat bog (southern Pyrenees) during the last seven millennia. *Vegetation History and Archaeobotany*, 21(4-5), 385–396. <https://doi.org/10.1007/s00334-012-0351-5>

- Pérez-Obiol, R., García-Codron, J.C., Pérez-Haase, A., Soriano, J.M. & Pèlach, A. (2015). *Vegetation dynamics, environmental contamination and fires during the Holocene, a comparison between two regions: La Molina (Cantabria) and La Bassa Nera (Catalonia)*. Medpalyno-GPSBI-Symposium, Roma, Italia.
- Pérez-Obiol, R., García-Codron, J.C., Pèlach, A., Pérez-Haase, A. & Soriano, J.M. (2016). Landscape dynamics and fire activity since 6740 cal yr BP in the Cantabrian region (La Molina peat bog, Puente Viesgo, Spain). *Quaternary Science Reviews*, 135, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.01.021>
- Pons, A. & Reille, M. (1988). The Holocene and Upper Pleistocene pollen record from Padul (Granada, Spain): a new study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 66, 243–263.
- Poschold, P. & Baumann, A. (2010). The historical dynamics of calcareous grasslands in the central and southern Franconian Jurassic mountains: a comparative pedoanthracological and pollen analytical study. *The Holocene*, 20(1), 13–23. <https://doi.org/10.1177/095968360934>
- Quednau, T. & Ludemann, T. (2017). First pedoanthracological study in the Black Forest, SW Germany. *Quaternary International*, 457, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.03.014>
- Ramos-Muñoz, J., Siles-Guerrero, F., Gutiérrez-López, J.M., Martínez-Enamorado, V. & Martín-Ruiz, J.A. (2017). *Actas del I Congreso internacional de historia de la Serranía de Ronda: las ocupaciones por sociedades prehistóricas, protohistóricas y de la antigüedad en la Serranía de Ronda y Béticas Occidentales*. Editorial La Serranía.
- Rasmussen, S.O., Andersen, K.K., Svensson, A.M., Steffensen, J.P., Vinther, B.M. et al. (2006). A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(D6), D06102. <https://doi.org/10.1029/2005JD006079>
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G. et al. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*, 62(4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Rincon, M.E. (2017). El origen del concepto ecosistema. *Bio-grafía*, 342–350. <https://doi.org/10.17227/20271034.vol.0num.0bio-grafia342.350>
- Robin, V., Rickert, B.H., Nadeau, M.J. & Nelle, O. (2011). Assessing Holocene vegetation and fire history by a multiproxy approach: the case of Stodthagen Forest (Northern Germany). *The Holocene*, 22(3), 337–346. <https://doi.org/10.1177/0959683611423687>
- Rodríguez-Ariza, M.O. (2004). Estudio antracológico. En Martín, D., Cálalich, M.D. & González, P. (Eds.), *Cueva de El Toro (Sierra de el Torcal, Antequera-Málaga)*. *Un modelo*

- de ocupación ganadera en el territorio andaluz entre el VI y el III milenios ANE (pp. 61–76). Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía.
- Rodríguez-Martínez, F. (1977). La Serranía de Ronda: síntesis geográfica. *Cuadernos Geográficos*, 7, 71–162.
- Ruiz de la Torre, J. (1990). *Mapa forestal de España*. ICONA.
- Ruíz de la Torre, J. (2013). Taxonomía y descripción morfológica del pinsapo. En López-Quintanilla, J. (Ed.), *Los pinsapares en Andalucía (Abies pinsapo Boiss.)*. Conservación y sostenibilidad en el siglo XXI (pp. 22–30). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba.
- Rundel, P., Arroyo, M., Cowling, R., Keeley, J., Lamont, B. et al. (2018). Fire and Plant Diversification in Mediterranean-Climate Regions. *Front. Plant Sci.*, 9(851), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00851>
- Sánchez-Robles, J.M., Balao, F., García-Castaño, J.L., Terrab, A., Navarro, L. et al. (2012). Nuclear microsatellite primers for the endangered relict fir, *Abies pinsapo* (Pinaceae) and cross-amplification in related Mediterranean species. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(11), 14243–14250. <https://doi.org/10.3390/ijms131114243>
- Sánchez-Salguero, R. (2007). *Distribución potencial de pinsapo (Abies pinsapo Boiss.) en el Parque Natural Sierra de Grazalema: Implicaciones para la regeneración de la especie bajo cubierta de pinar* (Trabajo Profesional Fin de Carrera). Universidad de Córdoba.
- Schirrmacher, J., Weinelt, M., Blanz, T., Andersen, N., Salgueiro, E. et al. (2019). Multi-decadal atmospheric and marine climate variability in southern Iberia during the mid- to late-Holocene. *Climate of the Past*, 15(2), 617–634. <https://doi.org/10.5194/cp-15-617-2019>
- Schoch, W., Heller, I., Schweingruber, F.H. & Kienast, F. (2004). *Wood anatomy of central European Species*.
- Schweingruber, F.H. (1990). *Microscopic wood anatomy: structural variability of stems and twigs in recent and subfossil woods from Central Europe*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
- Serrano-Lozano, F. & Guerra-Merchan, A. (2004). *Geología de la provincia de Málaga*. Centro de Publicaciones de la Diputación Provincial de Málaga.
- SIOSE (2013). *Cartografía de ocupación del suelo en Andalucía*. Recuperado de https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_siose_2013?
- SIMA (2023). Demografía y población. *Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía*. Recuperado de https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/badea/informe/anual?CodOper=b3_151&idNode=23204

- Smith, W., Germino, M., Johnson, D. & Reinhardt, K. (2009). The Altitude of Alpine Treeline: A Bellwether of Climate Change Effects. *The Botanical Review*, 75, 163–190. <https://doi.org/10.1007/s12229-009-9030-3>
- Soriano, J.M., Pèlach, A., Pérez-Obiol, R., Rodríguez, J.M. & Cunill-Artigas, R. (2016). Dinámica del abeto en el Pirineo catalán durante los últimos 10.000 años. En Gómez-Zotano, J., Arias-García, J., Olmedo-Cobo, J.A. & Serrano-Montes, J.L. (Eds.), *Avances en Biogeografía: áreas de distribución: entre puentes y barreras* (pp. 544–552). Editorial Universidad de Granada-Tundra Ediciones.
- Soto, D. (2006). Núcleos residuales de pinsapo perdidos en Andalucía en el siglo XX. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 79–86.
- Sweeney, L., Harrison, S. & Vander-Linden, M. (2022). Assessing anthropogenic influence on fire history during the Holocene in the Iberian Peninsula. *Quaternary Science Reviews*, 287, 107562. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107562>
- Talon, B. (1997). *Evolution des zones supra-forestières des Alpes sud-occidentales françaises au cours de l'Holocène – analyse pédoanthracologique* (Tesis Doctoral). Aix-Marseille Université.
- Talon, B. (2010). Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in the French southern Alps: evidence from soil charcoal. *The Holocene*, 20(1), 35–44. <https://doi.org/10.1177/0959683609348842>
- Talon, B., Carcaillet, C. & Thinin, M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes Françaises. *Geographie Physique et Quaternaire*, 52(2), 195–208. <https://doi.org/10.7202/004875ar>
- Talon, B., Payette, S., Filion, L. & Delwaide, A. (2005). Reconstruction of the long-term fire history of an old-growth deciduous forest in Southern Quebec, Canada, from charred wood in mineral soils. *Quaternary International*, 64(1), 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2005.03.003>
- Thinon, M. (1978). La pédoanthracologie: Une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le Néolithique. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 287, 1203–1206.
- Thinon, M. (1992). *L'analyse pédoanthracologique. Aspects méthodologiques et applications* (Tesis Doctoral). Université Aix-Marseille III.
- Toro-Moyano, I., Martínez-Navarro, B., Agustí, J., Souday, C., Bermúdez de Castro, J.M. et al. (2013). The oldest human fossil in Europe, from Orce (Spain). *Journal of Human Evolution*, 65(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2013.01.012>
- Unger (1846). Pflanzengeschichtliche Bemerkungen über den Kaiserwald bei Grätz. *Botanische Zeitung*, 7(17), 313–321.

- Uzquiano, P. (1997). Antracología y métodos: implicaciones en la economía prehistórica, etnoarqueología y paleoecología. *Trabajos de Prehistoria*, 54(1), 145–154.
- Valladares, A. (2009). 9520 Abetales de *Abies pinsapo* Boiss. En VV.AA. (Ed.), *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- Valle, M.F., Rivas-Carballo, M.R., Lucini, M., Ortiz, J.E. & Torres, T. (2003). Interpretación paleoclimática y paleoecológica del tramo superior de la Turbera de Padul (Granada, España). *Polen*, 13, 85–95.
- Van der Knaap, W.O., Van Leeuwen, J.F.N., Finsinger, W., Gobet, E., Pini, R. et al. (2005). Migration and population expansion of *Abies*, *Fagus*, *Picea*, and *Quercus* since 15,000 years in and across the Alps, based on pollen-percentage threshold values. *Quaternary Science Reviews*, 24(5-6), 645–680. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2004.06.013>
- Vanniere, B., Power, M.J., Roberts, N., Tinner, W., Carrión, J.S. et al. (2011). Circum-Mediterranean fire activity and climate changes during the mid-Holocene environmental transition (8500-2500 cal. BP). *The Holocene*, 21(1), 53–73. <https://doi.org/10.1177/0959683610384164>
- Varela, S., Lobo, J. & Hortal, J. (2011). Using species distribution models in paleobiogeography: A matter of data, predictors and concepts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 310(3-4), 451–463. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.07.021>
- Vega-Hidalgo, J.A. (1999). Historia del fuego de *Pinus pinaster* y *Abies pinsapo* en la cara norte de Sierra Bermeja (Málaga): 1817-1997. En Araque-Jiménez, E. (Ed.), *Incendios históricos. Una aproximación multidisciplinar* (pp. 279–312. Universidad Internacional de Andalucía.
- Vernet, J.L., Ogereau, P., Figueiral, I., Machado, C. & Uzquiano, P. (2001). *Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents, Sud-Ouest de l'Europe: France, Péninsule ibérique et Îles Canaries*. CNRS.
- Wiegand, G. (1989). Explanation and prediction in vegetation science. *Vegetatio*, 83, 17–34. <https://doi.org/10.1007/BF00031678>
- Willis, K.J., Bennett, K.D. & Birks, H.J.B. (1998). The late Quaternary dynamics of pines in Europe. En Richardson, D.M. (Ed.), *Ecology and biogeography of Pinus* (pp. 107–121). Cambridge University Press.
- Willis, K.J. & Birks, H.J. (2006). What is natural? The need for a long-term perspective in biodiversity conservation. *Science*, 314(5803), 1261–1265. <https://doi.org/10.1126/science.1122667>
- Willis, K.J., Araújo, M.B., Bennett, K.D., Figueroa-Rangel, B., Froyd, C.A. et al. (2007). How can a knowledge of the past help to conserve the future? Biodiversity conservation and the

- relevance of long-term ecological studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 362(1478), 175–187. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1977>
- Woodward, F.I. & McKee, F.I. (1991). Vegetation and climate. *Environment International*, 17(6), 535–546. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(91\)90166-N](https://doi.org/10.1016/0160-4120(91)90166-N)
- Ybert, J.P., Mareschi, W., Martins, E.L. & Kutner, M. (2003). Environmental and sea-level variations on the southeastern Brazilian coast during the Late Holocene with comments on prehistoric human occupation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 189(1-2), 11–24. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(02\)00590-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(02)00590-4)
- Zapata, L. (2012). Las transformaciones económicas del Neolítico en la Península Ibérica: la agricultura. En Rojo-Guerra, M.A., Garrido-Pena, R. & García-Martínez de Lagrán, I. (Eds.), *El Neolítico en la Península Ibérica y su contexto europeo* (pp. 95–106). Cátedra.
- Zurell, D, Jeltsch, F., Dormann, C.F. & Schroder, B. (2009). Static species distribution models in dynamically changing systems: How good can predictions really be? *Ecography*, 32(5), 733–744. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.05810.x>

ÍNDICE DE FIGURAS

1. ESTADO DEL ARTE

- Figura 1.** Izquierda: réplica del fragmento de cráneo VM-0, llamado Hombre de Orce, atribuido al género *Homo*. Derecha: diente de leche hallado en el yacimiento de Barranco León (Orce). Pertenece al género *Homo* y su antigüedad se ha establecido en 1.4 Ma, convirtiéndolo en el resto fósil más antiguo de toda Europa occidental. **26**
- Figura 2.** Muestra de carbón preservada en la cata de Arroyo de los Lobos 2. **27**

5. MARCO CONCEPTUAL

- Figura 3.** Detalle de las acículas de *A. pinsapo* (izquierda) y *A. maroccana* (derecha). **52**

6. ÁMBITO DE ESTUDIO: DELIMITACIÓN ESPACIOTEMPORAL

- Figura 4.** Comparativa de los límites de la Serranía de Ronda a nivel administrativo (arriba) y geográfico-histórico (abajo). **61**
- Figura 5.** Típico afloramiento peridotítico de Sierra Bermeja. **64**
- Figura 6.** Vista parcial del pinsapar de la Cañada de Enmedio (Sierra de las Nieves). **66**

7. METODOLOGÍA Y DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

- Figura 7.** Esquema sintético de las fases del análisis pedoantracológico. **69**
- Figura 8.** Catas pedológicas realizadas en la Serranía de Ronda durante la presente investigación. **70**
- Figura 9.** Excavación manual para la realización de uno de los muestreos llevados a cabo durante la presente investigación. **71**
- Figura 10.** Tamizado en húmedo de las muestras edáficas recogidas en campo. **71**
- Figura 11.** Planos anatómicos del género *Abies*. Izquierda: plano transversal, en el cual destaca la ausencia de canales de resina. Centro: plano longitudinal tangencial, donde sobresale un radio con una altura superior a 15 células, una característica anatómica muy singular en **72**

este género. Derecha: plano longitudinal radial, en el que se aprecian radios homocelulares y ausencia de traqueidas radiales

8. LA PEDOANTRACOLOGÍA EN ESPAÑA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Figura 12. Número de muestreos pedoantracológicos según localización. **90**

9. PRIMEROS DATOS SOBRE LA COMPOSICIÓN HOLOCENA DE LOS BOSQUES DE MONTAÑA EN EL PARQUE NATURAL DE LA SIERRA DE LAS NIEVES (SERRANÍA DE RONDA) A PARTIR DEL ANÁLISIS PEDOANTRACOLÓGICO

Figura 13. Ámbito de estudio. **104**

Figura 14. Bosque abierto de *Abies pinsapo* en las inmediaciones de la Cañada de Enmedio (P.N. Sierra de las Nieves), en un entorno en el que predomina una intensa deforestación del medio. **105**

Figura 15. Rodal abierto y desestructurado de *Quercus alpestris* en el Puerto de Pilonos (P. N. Sierra de las Nieves). **106**

Figura 16. Muestreos pedológicos realizados durante el trabajo de campo (1. Navacillo 1; 2. Navacillo 2; 3. Navacillo 3; 4. Puerto de Lifa; 5. Fuenfría Alta; 6. Cañada de Enmedio; 7. Cañada del Cuerno; 8. Puerto de los Valientes; 9. Pilonos 1; 10. Pilonos 2). **108**

Figura 17. Dataciones radiocarbónicas. **117**

10. THE HISTORY OF *ABIES PINSAPO* DURING THE HOLOCENE IN SOUTHERN SPAIN, BASED ON PEDOANTHRAOLOGICAL ANALYSIS

Figura 18. Topographic map of the study area showing the sampled sites (numbers and sites in Table 7). **144**

Figura 19. Percentages of charcoal taxa identified, by sampling levels, from each of the sites where *Abies* sp was identified. **147**

Figura 20. Current distribution of *Abies pinsapo* and ancient populations of *Abies* sp. discovered in this research. **153**

11. PALEOPOPULATIONS AND ECOLOGICAL CONNECTIVITY IN THE NATURA 2000 NETWORK: PROPOSAL FOR THE SERPENTINE-SOIL SPANISH FIRS OF SIERRA BERMEJA (SERRANÍA DE RONDA)

- Figura 21.** Study area and location of the pedoanthracological samplings conducted during this research. **170**
- Figura 22.** Photographs illustrating the pedoanthracological method applied at the "Palmitera 1" site: a) Carrying out the sampling; b) Preparing the edaphological profile; c) Charcoal sample; d) Sieving; e) Selected charcoal fragments. **171**
- Figura 23.** Taxonomic identifications in each of the sampling sites in Sierra Bermeja. **173**
- Figura 24.** Core areas for the serpentine-soil Spanish fir corridor (A, Los Reales; B, Plaza de Armas). **175**
- Figura 25.** Map of the corridor for the serpentine-soil Spanish fir and its main gene flow. **176**
- Figura 26.** Ridge of Sierra Bermeja which would form part of the ecological corridor of the serpentine-soil Spanish fir forest. **176**
- Figura 27.** Localities in which *A. pinsapo* has been reintroduced. **178**
- Figura 28.** a) Seeding work in the publicly-owned mountainside of Sierra Bermeja de Igualeja; b) Seeds classified according to the Spanish fir forest of origin; c and d) Private Spanish fir plantation project in the Venta del Madroño; e and f) Reforestation activities for the creation of the Bosque Eterno (Eternal Forest) **178**

12. EUROPE'S SOUTHERNMOST INTERGLACIAL REFUGIA AS SENTINELS FOR THE LOCAL EXTINCTION OF MOUNTAIN CONIFERS

- Figura 29.** Sites sampled during this research (numbers and sites in Table 10). **195**
- Figura 30.** Altitudinal zonation of the current vegetation in Sierra Blanca de Igualeja. **197**
- Figura 31.** Taxa identified in each one of the six samplings conducted (expressed in %). **201**
- Figura 32.** Radial section of a charcoal fragment of *P. nigra/sylvestris*-type. One of its main anatomical characteristics is the existence of rays with large **203**

fenestriform pits.

- Figura 33.** Paleo-populations of *P. nigra/sylvestris*-type found during the research, other evidence of its past presence and current distribution range of *P. nigra* and *P. sylvestris* in the south of the Iberian Peninsula. **204**
- Figura 34.** Pedoanthracological and palynological evidence of *A. pinsapo* and native range and potential distribution of *A. pinsapo*. **205**

13. MULTIPROXY ANALYSIS FOR THE PALEOBIOGEOGRAPHICAL RECONSTRUCTION OF THE RELICT FORESTS OF THE SERRANÍA DE RONDA DURING THE HOLOCENE (BAETIC SYSTEM, SPAIN)

- Figura 35.** Sampling sites on the topographic map of the study area. Pedoanthracological sampling sites: 1) Palmitera 1, 2) Palmitera 2, 3) Palmitera 3, 4) Palmitera 4, 5) Los Reales 1, 6) Los Reales 2, 7) Los Reales 3, 8) Los Reales 4, 9) Arroyo del Toro, 10) Majada del Toro, 11) Puerto del Hoyo, 12) Jardón 1, 13) Jardón 2, 14) Cerro de los Sauces, 15) Cerro Barretos, 16) Puerto de la Encina, 17) Cascajares 1, 18) Cascajares 2, 19) Cascajares 3, 20) Cascajares 4, 21) Fuenfría Alta, 22) Arroyo de los Lobos 1, 23) Arroyo de los Lobos 2, 24) La Nava, 25) Navacillo 1, 26) Navacillo 2, 27) Navacillo 3, 28) Cancha de Almola, 29) Jarastepar 1, 30) Jarastepar 2, 31) Cañada del Cuerno, 32) Cañada de Enmedio, 33) Pilonos 1, 34) Pilonos 2, 35) Puerto de los Valientes, 36) Sierra de los Pinos, 37) Sierra del Pinar 1, 38) Sierra del Pinar 2, 39) Llanos de Rabel, 40) Puerto de Lifa, 41) Lijar, 42) Tablón, 43) Terril. Yellow spots mark the new sampling sites carried out during the present study. Palynological survey: Cañada de las Ánimas (grey spot). **220**
- Figura 36.** Absolute frequency of identified taxa (n° of charcoal fragments) for the Serranía de Ronda as a whole. **224**
- Figura 37.** Ancient populations of different tree taxa found in this research, and in the Serranía de Ronda as a whole. **226**
- Figura 38.** Pollen diagram of the sequence from Las Ánimas. **230**
- Figura 39.** Evidences of fire detected in the Serranía de Ronda as a whole. The signs detected during this research are shown in red. The mean values for the different chronological ranges are also indicated. **237**

14. APROXIMACIÓN PALEOBIOGEOGRÁFICA A LA SIERRA DEL TABLÓN (SERRANÍA DE RONDA, ESPAÑA)

- Figura 40** Mapa de situación del ámbito de estudio. **250**

Figura 41.	Contraste del relieve alomado de la Sierra del Tablón con el abrupto Peñón de Algámitas (izquierda). Detalle de la ladera norte del Terril estabilizada por la vegetación y de los depósitos de ladera descubiertos en una cantera (derecha).	251
Figura 42.	Encinar joven en regeneración predominante en la Sierra del Tablón, orlado por una facies predominantemente arbustiva de <i>Q. coccifera</i> , <i>C. monogyna</i> y <i>J. oxycedrus</i> , aunque con elementos arborescentes (principalmente <i>P. lentiscus</i>). La degradación de ambas etapas deja paso a un matorral serial integrado esencialmente por <i>C. albidus</i> , <i>U. parviflorus</i> y <i>P. purpurea</i> . Allí donde la pendiente lo permite, el suelo está ocupado por el cultivo de olivar. Umbría del pico Terril.	253
Figura 43.	Ortofotografías de la Sierra del Tablón correspondientes al vuelo americano del año 1956 (arriba) y al vuelo PNOA del año 2019 (abajo).	255
Figura 44.	Áreas afectadas por los incendios forestales en 1989 y 1991.	256
Figura 45.	Localidades de muestreo en la Sierra del Tablón.	257
Figura 46.	Perfil edáfico, valores de antracomasa (mg kg ⁻¹) y taxones identificados por nivel de muestreo en Tablón I.	259
Figura 47.	Perfil edáfico, valores de antracomasa (mg kg ⁻¹) y taxones identificados por nivel de muestreo en Tablón II.	260

15. ABIES PINSAPO E INCENDIOS FORESTALES: UNA LARGA HISTORIA DE SUPERVIVENCIA A EVENTOS EXTREMOS EN SIERRA BERMEJA (SW BAETIC SYSTEM)

Figura 48.	Ámbito de estudio y localización de los muestreos pedoantracológicos efectuados durante el transcurso de la presente investigación.	272
Figura 49.	Taxones identificados en los distintos muestreos pedológicos.	277
Figura 50.	Identificación de las áreas recorridas por el fuego en una o más ocasiones desde 1975 hasta 2021.	280

16. DISCUSIÓN GENERAL

Figura 51.	Poblaciones actuales de <i>A. pinsapo</i> y principales paleopoblaciones descubiertas mediante el análisis pedoantracológico.	297
-------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

Figura 52. Plantación de *A. pinsapo* en el marco del proyecto “Camino hacia al pinsapar”.

304

ÍNDICE DE TABLAS

6. ÁMBITO DE ESTUDIO: DELIMITACIÓN ESPACIOTEMPORAL

Tabla 1.	Grupos funcionales principales en los que se incluyen los bosques de la Serranía de Ronda.	65
-----------------	--------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

8. LA PEDOANTRACOLOGÍA EN ESPAÑA: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Tabla 2.	Síntesis informativa por áreas de estudio derivada de la bibliografía consultada.	79
-----------------	-----------------------------------------------------------------------------------	-----------

9. PRIMEROS DATOS SOBRE LA COMPOSICIÓN HOLOCENA DE LOS BOSQUES DE MONTAÑA EN EL PARQUE NATURAL DE LA SIERRA DE LAS NIEVES (SERRANÍA DE RONDA) A PARTIR DEL ANÁLISIS PEDOANTRACOLÓGICO

Tabla 3	Georreferenciación y condiciones geocológicas de las localidades donde se han efectuado los muestreos pedológicos.	109
----------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

Tabla 4	Profundidad, niveles de muestreo y tasas de antracomasa en cada uno de los puntos de muestreo efectuados.	110
----------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

Tabla 5	Número de identificaciones y representatividad de los taxones (en %) en cada muestreo (en negrita aparecen resaltados los taxones arbóreos). Localidades: 1. Navacillo 1; 2. Navacillo 2; 3. Navacillo 3; 4. Puerto de Lifa; 5. Fuenfría Alta; 6. Cañada de Enmedio; 7. Cañada del Cuerno; 8. Puerto de los Valientes; 9. Pilonos 1; 10. Pilonos 2.	114
----------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

Tabla 6	Resultado de las dataciones radiocarbónicas de las muestras seleccionadas. Para las muestras subactuales, inferiores a 400 años, la edad calibrada corresponde a la fecha.	116
----------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

10. THE HISTORY OF *ABIES PINSAPO* DURING THE HOLOCENE IN SOUTHERN SPAIN, BASED ON PEDOANTHRAOLOGICAL ANALYSIS

Tabla 7	Charcoal values in mg/kg soil sample, number of samples and specific anthracomass of <i>Abies</i> sp.	148
----------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

Tabla 8	C ¹⁴ dates of <i>Abies</i> sp. by sites. Dates by Poznań radiocarbon laboratory (Poznań, Poland) and AlfredWegener-Institut (Bremerhaven, Germany).	149
----------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

11. PALEOPOPULATIONS AND ECOLOGICAL CONNECTIVITY IN THE NATURA 2000 NETWORK: PROPOSAL FOR THE SERPENTINE-SOIL SPANISH FIRS OF SIERRA BERMEJA (SERRANÍA DE RONDA)

Tabla 9	Chronologies obtained by radiocarbon dating for samples of <i>Abies</i> sp.	174
----------------	-----------------------------------------------------------------------------	------------

12. EUROPE'S SOUTHERNMOST INTERGLACIAL REFUGIA AS SENTINELS FOR THE LOCAL EXTINCTION OF MOUNTAIN CONIFERS

Tabla 10	Geographic characteristics of the sampling sites.	199
-----------------	---------------------------------------------------	------------

Tabla 11	Charcoal dating.	202
-----------------	------------------	------------

13. MULTIPROXY ANALYSIS FOR THE PALEOBIOGEOGRAPHICAL RECONSTRUCTION OF THE RELICT FORESTS OF THE SERRANÍA DE RONDA DURING THE HOLOCENE (BAETIC SYSTEM, SPAIN)

Tabla 12	Anthracomass values and taxonomic identifications for each of the pedoanthracological samplings conducted in the Serranía de Ronda as a whole.	224
-----------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

Tabla 13	Ages obtained for 110 charcoal fragments subjected to radiocarbon C ¹⁴ dating.	227
-----------------	-------------------------------------------------------------------------------------------	------------

14. APROXIMACIÓN PALEOBIOGEOGRÁFICA A LA SIERRA DEL TABLÓN (SERRANÍA DE RONDA, ESPAÑA)

Tabla 14	Datos geográficos de la localidad de muestreo Tablón I.	257
-----------------	---------------------------------------------------------	------------

Tabla 15	Datos geográficos de la localidad de muestreo Tablón II.	258
-----------------	----------------------------------------------------------	------------

Tabla 16	Dataciones radiocarbónicas obtenidas para diferentes fragmentos de los géneros <i>Quercus</i> (3) y <i>Pinus</i> (1).	261
-----------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------

15. ABIES PINSAPO E INCENDIOS FORESTALES: UNA LARGA HISTORIA DE SUPERVIVENCIA A EVENTOS EXTREMOS EN SIERRA BERMEJA (SW BAETIC SYSTEM)

Tabla 17	Características geoecológicas de las localidades de muestreo.	274
-----------------	---------------------------------------------------------------	------------

Tabla 18	Cronologías obtenidas para los 28 carbones de <i>Abies</i> datados radiocarbónicamente.	278
-----------------	-----------------------------------------------------------------------------------------	------------

Tabla 19	Incendios forestales y pinsapos afectados en Sierra Bermeja durante el periodo 1950-2021.	279
Tabla 20	Superficie quemada y recurrencia del fuego en Sierra Bermeja.	280