

UNIVERSIDAD DE GRANADA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



DEPARTAMENTO DE URBANISMO Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

Programa de Doctorado:

Urbanismo, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente (212/2)

Línea de Investigación:

“Simulación urbana y territorial mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica”

TESIS DOCTORAL

**CARTOGRAFÍAS DE PROCESOS Y FLUJOS:
APLICACIONES A LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y URBANA.**

Francisco Emilio Molero Melgarejo.

Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

GRANADA, Junio de 2011

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: Francisco Emilio Molero Melgarejo
D.L.: GR 523-2012
ISBN: 978-84-694-9403-5

La memoria titulada CARTOGRAFÍAS DE PROCESOS Y FLUJOS: APLICACIONES A LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y URBANA, que presenta D. Francisco Emilio Molero Melgarejo para optar al grado de DOCTOR, ha sido realizada en el recientemente creado Dpto. de Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Granada, antes Área de Urbanismo y Ordenación del Territorio perteneciente al Dpto. de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, bajo la dirección del Doctor D. Alejandro Luis Grindlay Moreno y del Catedrático de Urbanismo D. José Luis Gómez Ordóñez.

Granada, Julio de 2011

INDICE

CAPITULO 1.

Introducción, hipótesis, objetivos y estructura de la tesis.....1

1.1. Introducción

1.2. Hipótesis de partida

1.3. Objetivos

1.4. Estructura de la tesis

CAPITULO 2

Bases para una nueva lectura física del territorio y su representación.....5

2.1. Los avances en la lectura y comprensión del territorio

2.1.1. La información geográfica digital en la representación del territorio.

2.1.1.1. Las componentes espacial, temática y temporal

2.1.1.2. Modelos de datos. Bases de datos espaciales

2.1.1.3. La información georreferenciada o geoinformación.

2.1.1.4. Los modelos digitales de terreno, base de todo proyecto territorial.

2.1.1.4.1. Aplicaciones y Modelos derivados

2.1.1.4.2. Modelos de elevaciones comerciales y Sistemas LIDAR

2.1.1.4.3. Generación de un mdt. Técnicas de interpolación.

2.1.2. La expresión cartográfica: Cartografía temática y semiología gráfica.

2.1.3. Nuevas Cartografías y técnicas de visualización.

2.1.3.1. Geovisualización y visualización científica

2.1.3.2. Geoinformación y redes sociales.

2.1.3.3. Cartografía Multimedia, Interactividad y animación

2.1.3.4. Visualización de información temática en 3D y en realidad virtual

2.2. El tratamiento de la información geográfica.

2.2.1. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

2.2.2. El análisis de la información geográfica:

2.2.2.1. Análisis local: Reclasificación y superposición

2.2.2.2. Análisis de vecindad inmediata.

2.2.2.3. Análisis de vecindad extendida.

2.2.2.4. Análisis zonal.

2.3. Aplicaciones de los SIG en los proyectos de planificación territorial y urbana

2.3.1. La gestión de redes de infraestructuras urbanas

2.3.2. Aplicaciones en la Gestión Urbanística.

2.3.3. Los SIG en las etapas de un proyecto de planificación.

2.4. El marco legal.

2.4.1. Las directivas europeas INSPIRE y SEIS.

2.4.2. La ley Lisige, el Instituto de Estadística y Cartografía y el plan cartográfico de Andalucía 2009-2012.

2.4.3. El cambio de sistema de referencia geodésico oficial en España.

2.4.4. Las infraestructuras de datos espaciales (IDE). Servidores OGC.

CAPITULO 3

Cartografías de procesos y flujos.....83

3.1. Introducción.

3.2. La Modelización hidrológica en la planificación municipal.

3.2.1. Modelos Unidimensionales

3.2.2. Modelos Bidimensionales

3.2.3. Modelos hidrológico-hidráulicos y Sistemas de Información Geográfica.

3.2.4. Mapas de peligrosidad y riesgo de inundación en la planificación territorial y urbanística.

3.2.4.1. El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) y los mapas de riesgo de inundación en el planeamiento municipal.

3.2.4.2. Avances en la gestión del riesgo de inundación

3.2.4.3. Ejemplo de Aplicación.

3.2.5. Cartografías temáticas en la gestión integrada de cuencas hidrográficas.

3.2.5.1. Caracterización territorial en la cuenca del Guadalfeo

3.2.5.2. Propuesta de ámbitos para la coordinación hidrológico-territorial en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir.

3.2.5.3. Transformación territorial y paisajes del agua en la cuenca del Segura.

3.3. El Análisis de redes y la planificación del transporte

3.3.1. Análisis de redes. Rutas óptimas.

3.3.2. Polígonos de Thiessen y áreas de influencia.

3.3.3. La modelización de las redes. (Network analyst)

3.3.4. La modelización en la planificación del transporte

3.3.4.1. Los planes de movilidad urbana sostenible.

3.3.4.1.1. Análisis de la Oferta de transporte.

3.3.4.1.2. Análisis de la Demanda de transporte.

3.3.4.1.3. Modelos de Demanda de transporte.

3.3.4.1.4. Comparación de la Oferta y la Demanda de transporte.

3.3.4.2. La modelización de la accesibilidad territorial.

3.3.4.2.1. Generación de la Superficie de fricción

3.3.4.2.2. El algoritmo Costo-Distancia

3.3.4.2.3. La elección del objetivo. Indicadores de accesibilidad.

3.3.4.2.4. Los Gradientes de accesibilidad.

3.4. El impacto territorial de las nuevas infraestructuras viarias. Aplicaciones prácticas.

3.5. Conclusiones

CAPITULO 4

Localización óptima de infraestructuras. Cartografías de aptitud.....171

4.1. Introducción

4.2. Metodologías para la ubicación óptima de equipamientos. Capacidad de acogida del territorio.

4.2.1. Localización de instalaciones de tipo puntual

4.2.1.1. Modelos de localización óptima para instalaciones deseables.

4.2.1.2. Modelos de localización óptima para instalaciones no deseables.

4.2.2. Localización de rutas y otras infraestructuras lineales.

4.2.3. Asignación óptima de los usos del suelo

4.3. Aplicación de una nueva metodología para ubicación de vertederos de residuos urbanos con Sistemas de Información Geográfica.

4.3.1. Metodología

4.3.1.1. Variables de vertedero e Indicadores de Impacto

4.3.1.2. Índice de Probabilidad de Contaminación y Valor Ambiental

4.3.1.3. Índice de Riesgo Ambiental

4.3.1.4. Índice de Idoneidad para la Ubicación de Vertederos

4.3.2. Ejemplo de aplicación

4.3.2.1. Modelización de las variables del vertedero

4.3.2.2. Implementación del modelo

4.3.2.2.1. Cartografías del Índice de Riesgo de Contaminación.

4.3.2.2.2. Cartografías de los Índices de Probabilidad de Contaminación.

4.3.2.2.3. Cálculo de los Valores Ambientales y Cartografías de los Índices de Riesgo Ambiental.

4.3.2.2.4. Cartografía del Índice de Idoneidad de Ubicación de Vertederos.

4.4. Conclusiones

CAPITULO 5

Escenarios de aptitud: Selección de alternativas y Evaluación multicriterio.....201

5.1. Introducción

5.2. El Proceso de Toma de Decisión

5.3. Los Métodos de Evaluación y Decisión Multicriterio

5.3.1. Ponderación Lineal (scoring),

5.3.2. Utilidad multiatributo (MAUT),

5.3.3. Relaciones de superación

5.3.4. Proceso analítico Jerárquico (AHP - Analytic Hierarchy Process).

5.4. Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. Aplicación a la cuenca del Río Guadalfeo (Granada)

5.4.1. Ámbito de estudio

5.4.2. La modelización de la accesibilidad

5.4.3. La Aptitud para la urbanización

5.4.4. Análisis de la dinámica poblacional.

5.4.5. Incorporación de variables espaciales: Capacidad de carga poblacional y coeficiente de aptitud

5.4.6. Resultados

5.5. Conclusiones

CAPITULO 6

Modelos geomáticos para la simulación prospectiva de dinámicas territoriales.....227

6.1. Introducción

6.2. Modelos geomáticos para la simulación de dinámicas territoriales.

6.2.1. Modelos deterministas

6.2.2. Modelos probabilísticos, estocásticos o de Monte Carlo

6.2.2.1. Cadenas de Markov (MCA)

6.2.3. Modelos basados en inteligencia artificial

6.2.3.1. Autómatas celulares

6.2.3.2. Sistemas Multi-Agente

6.2.3.3. Redes neuronales

6.2.4. Lógica difusa

6.2.5. Herramientas para la modelización

6.2.5.1. LCM (Land Change Modeller)

6.2.5.2. Markov

6.2.5.3. CA_Markov

6.2.5.4. Otras herramientas.

6.3. Modelización prospectiva del paisaje y los usos del suelo.

6.4. Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de uso del suelo. Evaluación del potencial de cambio. Comparativa entre CA_Markov y LCM

6.4.1. Ámbito de estudio.

6.4.2. Metodología

6.4.3. Resultados

6.4.4. Discusión y Conclusiones

6.5. Los Gradientes de Accesibilidad Territorial en la simulación del Crecimiento Urbano de la Región de Murcia. Análisis y valoración mediante métricas e índices espaciales

6.5.1. Ámbito de estudio

6.5.1.1. Cartografía de partida y bases de datos

6.5.1.2. Dinámica de los usos del suelo. Zonas urbanas, industriales y de transporte

6.5.2. Objetivos

6.5.3. Metodología

- 6.5.3.1. Factores y restricciones del crecimiento urbano
- 6.5.3.2. Simulación del crecimiento urbano
- 6.5.3.3. Fragilidad eco-paisajística y visual

6.5.4. Resultados

- 6.5.4.1. Simulación del crecimiento urbano en 2006 y 2020
- 6.5.4.2. Fragilidad eco-paisajística.

6.6. Discusión y Conclusiones

CAPITULO 7

Cartografiar el tiempo.....267

7.1. Aproximaciones a la representación del espacio tiempo.

- 7.1.1. Análisis dinámicos y estudios multitemporales
- 7.1.2. Cartogramas.
- 7.1.3. Anamorfosis, la deformación del espacio.

7.2. Las ciudades en tiempo real.

7.3. Cartografiando la actividad urbana. Una aplicación práctica en la ciudad de Almería.

- 7.4.1. Introducción.
- 7.4.2. Datos de partida.
- 7.4.3. Metodología.
- 7.4.4. Resultados.

7.4. Conclusiones.

CAPITULO 8

Taller de planificación territorial mediante Sistemas de Información Geográfica: Una aplicación docente en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Granada.....297

8.1. Introducción.

8.2. Una aplicación docente en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada.

- 8.2.1. Objetivos.
- 8.2.2. Desarrollo de la experiencia.
- 8.2.3. Metodología aplicada.
- 8.2.4. Resultados y conclusiones.

8.3. Evolución del proyecto y retos de futuro.

- 8.3.1. Taller de planificación: Análisis territorial mediante SIG.
- 8.3.2. Sistemas de Información Geográfica y Visualización.
- 8.3.3. Un proyecto de Innovación Docente.
- 8.3.4. Máster Universitario en Urbanismo.

CAPITULO 9	
Discusión y conclusiones.....	311
9.1. Sobre los resultados obtenidos y las principales aportaciones.	
9.2. Líneas de investigación futuras.	
English text.....	319

4.3. Evaluation of a municipal landfill site in souther Spain with GIS - aided methodology

CHAPTER 9	
Discussion and Conclussions	
9.1. Result obtained regarding to the objetives of the thesis	
9.2. Future reseach	
Bibliografía y Referencias.....	341
Índice de figuras y tablas.....	355

CAPITULO 1.

Introducción, hipótesis, objetivos, estructura y principales aportaciones de la tesis.....1

1.1. Introducción

1.2. Hipótesis de partida

1.3. Objetivos

1.4. Estructura de la tesis

1 INTRODUCCIÓN, HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

1.1. Introducción

“Cartografiar, hacer mapas, es descubrir un territorio, construir una visión del mismo. Hay muchas cartografías posibles de un territorio: tantas como intenciones, perspectivas y técnicas implicadas en su realización”. (J.L. Gómez Ordóñez).

La Cartografía, como representación conceptual del territorio y, por tanto, vital para su reconocimiento, resulta imprescindible en la Planificación y Ordenación del Territorio. En palabras de de J. L. Gómez, *“podría decirse que Planificación y Urbanismo es igual a Ingeniería más Cartografía. Es decir el ingeniero se convierte en planificador y urbanista cuando se hace consciente del lugar en el que interviene.”*

Este trabajo, concebido y orientado a la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos durante una década de investigación, docencia y práctica profesional, es el fruto de mi preocupación por las nuevas formas de representar los territorios y las ciudades, de los retos que se han ido proponiendo en el seno del Laboratorio de Urbanismo de la Universidad de Granada y sobre todo de la vocación docente que me permite el regalo de poder transmitir a los futuros ingenieros de caminos las metodologías que aquí se presentan, tan útiles para su formación y futuro profesional.

Pretende ser aplicado y práctico, accesible y útil para los alumnos de las asignaturas que imparto en la E.T.S. de Ingenieros y sobre todo fácil de leer para un profano en las distintas materias que aquí se tocan.

La innovación viene de esta “practicidad”, de la utilidad de los resultados para generar nuevos interrogantes, de sus aplicaciones a la docencia en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos y al trabajo profesional del ingeniero.

No se trata de una tesis sobre planificación, ni se pretende teorizar sobre modelos prospectivos ni sobre metodologías de localización óptima, ni siquiera es una tesis sobre cartografía, el objetivo es otro.

1.2. Hipótesis de partida

En este contexto, se toman como hipótesis de trabajo las siguientes:

La generación de cartografías multiescalares, mediante innovadoras técnicas derivadas de los sistemas de información geográfica, como resultado final de metodologías propias de distintas especialidades o ramas de conocimiento, de la hidráulica y la hidrología, de la planificación urbanística, de la geografía cuantitativa, o de los estudios del paisaje, podría permitir nuevas lecturas del territorio, ayudar a la comprensión de los procesos territoriales, de las dinámicas ambientales, y de los fenómenos urbanos que tan importantes transformaciones están sufriendo en la actualidad y aportar nuevos puntos de vista para el ingeniero en su faceta de planificador.

La utilización de métodos de evaluación y decisión multicriterio y la generación de escenarios temporales acordes a la aptitud del territorio, pueden ser instrumentos útiles en los procesos de planificación y toma de decisiones en territorios complejos y dinámicos.

Los modelos geomáticos de simulación prospectiva permiten un acercamiento a los procesos espacio-temporales, mostrando, por extrapolación en el tiempo, lo que puede suceder en un momento desconocido, y permitiendo la mejor comprensión de los fenómenos territoriales estudiados, de sus variables explicativas y de los posibles escenarios futuros.

La utilización de estas metodologías en el ámbito docente, además de facilitar al alumnado el aprendizaje y la maduración de los conocimientos teóricos, supone un recurso muy interesante y una herramienta útil para la realización de cualquier trabajo que tenga una componente territorial y en sus proyectos de fin de carrera.

Para tratar de demostrar estas hipótesis, en el presente trabajo se desarrolla de forma progresiva un acerca-

miento a la representación gráfica de la variable temporal, comenzando por una descripción de las herramientas, conceptos y metodologías aplicadas e ilustrando cada una de ellas con ejemplos de aplicación prácticos elaborados en el transcurso de estos últimos diez años en varias decenas de proyectos de investigación y en fugaces etapas de práctica profesional.

1.3. Objetivos de la tesis

De acuerdo con las hipótesis de partida, el principal objetivo del trabajo será el de mostrar, gracias al empleo de técnicas innovadoras en el ámbito ingenieril, ejemplos de estas representaciones gráficas, cartografías e imágenes sugerentes y el proceso metodológico seguido para su generación y dejar constancia de la utilidad práctica que tienen en el ámbito de la planificación territorial y urbana y en el de su enseñanza.

A continuación se resume el contenido de los nueve capítulos en los que está estructurada la tesis.

1.4. Estructura de la tesis

En el **capítulo primero** se presenta la justificación de la Tesis, las hipótesis y los objetivos que se pretenden alcanzar con el desarrollo de la misma y por último se muestra como está estructurado el documento.

En el **capítulo segundo**, titulado *Bases para una nueva lectura física del territorio y su representación*, se presentan los más recientes avances en la lectura y comprensión del territorio. Partiendo de la indudable influencia de las herramientas informáticas y de internet en la sociedad actual y el uso de la información digital en sus diferentes modalidades, se muestran las bondades de los modelos digitales de terreno y de las nuevas formas y técnicas de visualización. El tratamiento de esta información georreferenciada mediante los Sistemas de Información Geográfica y sus múltiples utilidades en el ámbito de la planificación territorial y urbana dan paso finalmente a las directrices y nuevos conceptos surgidos desde iniciativas europeas y que conforman el epígrafe referente al marco legal.

En el **tercer capítulo**, cuya denominación hace referencia directa al título de la tesis, *Cartografías de procesos y flujos*, se aborda el reto de representar la evolución en el tiempo de ciertos fenómenos, el fluir de elementos como el agua en un cauce fluvial o el tráfico en un núcleo urbano.

La modelización hidrológica en la planificación municipal, y los mapas de riesgo de inundación, el análisis de redes y la planificación del transporte o el impacto territorial de las nuevas infraestructuras viarias son tratados de forma práctica mediante la explicación de las metodologías seguidas y los resultados gráficos generados.

La modelización de la accesibilidad territorial expuesta en este capítulo será aplicada en capítulos posteriores con diferentes objetivos.

En el **capítulo cuarto**, titulado *Localización óptima de infraestructuras y equipamientos. Cartografías de aptitud*, tras la exposición de diferentes modelos de localización, se realiza una aproximación a la representación de la capacidad de acogida o la aptitud del territorio como elemento indispensable en el complejo problema de la búsqueda del emplazamiento ideal de elementos singulares.

Para concluir el capítulo se presenta una metodología basada en la superposición de cartografías de índices ambientales generadas mediante un Sistema de Información Geográfica como herramienta para la toma de decisiones en relación a la ubicación idónea de un vertedero de residuos no peligrosos.

Escenarios de aptitud: Selección de alternativas y Evaluación multicriterio es el título elegido para el **quinto capítulo**. Comienza describiendo los diferentes métodos de evaluación y decisión multicriterio y el proceso de generación de escenarios temporales acordes a la aptitud del territorio para culminar en un intento de simulación prospectiva.

Se presenta una modelización del crecimiento urbano como aplicación práctica de las metodologías expuestas y teniendo los modelos de accesibilidad descritos en el capítulo tercero como una de las variables explicativas de la evolución del fenómeno urbanizador.

En el **capítulo sexto** y avanzando en la compleja tarea de la representación de los procesos espacio-temporales, se realiza una revisión de los diferentes modelos geomáticos utilizados para la simulación prospectiva de dinámicas territoriales. Dos de estos modelos, aplicados a la simulación del cambio en el uso del suelo, son utilizados a modo de comparativa para posteriormente aplicar a los resultados métricas e indicadores de análisis espacial que servirán para su valoración. La aplicación práctica presentada para las dinámicas urbanas, culmina con la identificación y representación espacial de las alteraciones en la fragilidad paisajística de la región

El **capítulo séptimo** es quizás el más novedoso y ambicioso de todos y el que, a mi juicio, más expectativas de continuación presenta. Titulado *Cartografiar el tiempo* pretende resumir el proceso de aproximación al grafiado de la variable temporal, desde los análisis dinámicos y estudios multitemporales de los que se nutre el resto de los capítulos, hasta la aplicación práctica desarrollada en un ámbito urbano, aprovechando las nuevas técnicas ligadas a la electrónica, a las telecomunicaciones y a la informática.

El reto en este caso consiste en cartografiar la actividad en el centro una ciudad utilizando para ello la densidad de las llamadas telefónicas realizadas por sus ciudadanos desde terminales móviles, durante las 24 horas de un día laborable y otro festivo.

En el **capítulo octavo** se presenta una innovadora aplicación docente en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Granada, denominada *Taller de planificación territorial mediante Sistemas de Información Geográfica*.

Se muestra el origen y la evolución del proyecto, la metodología utilizada y los resultados obtenidos, las dificultades encontradas en el proceso y los retos de futuro. Se presentan finalmente algunas de las cartografías realizadas por el alumnado en el transcurso de la experiencia docente.

Finalmente en el **capítulo noveno** se presentan las conclusiones sobre los resultados obtenidos, las principales aportaciones y las futuras líneas de investigación.

Con objeto de cumplir con la normativa para la mención de Doctorado Europeo se incluyen los textos en un idioma oficial de la Unión Europea distinta a cualquiera de las lenguas oficiales en España:

English text

Evaluation of a municipal landfill site in souther Spain with GIS - aided methodology

Chapter 8: Discussion and Conclussions

Bibliografía y Referencias.

Índice de figuras y tablas.

CAPITULO 2

Bases para una nueva lectura física del territorio y su representación.....5

2.1. Los avances en la lectura y comprensión del territorio

- 2.1.1. La información geográfica digital en la representación del territorio.
 - 2.1.1.1. Las componentes espacial, temática y temporal
 - 2.1.1.2. Modelos de datos. Bases de datos espaciales
 - 2.1.1.3. La información georreferenciada o geoinformación.
 - 2.1.1.4. Los modelos digitales de terreno, base de todo proyecto territorial.
 - 2.1.1.4.1. Aplicaciones y Modelos derivados
 - 2.1.1.4.2. Modelos de elevaciones comerciales y Sistemas LIDAR
 - 2.1.1.4.3. Generación de un mdt. Técnicas de interpolación.
- 2.1.2. La expresión cartográfica: Cartografía temática y semiología gráfica.
- 2.1.3. Nuevas Cartografías y técnicas de visualización.
 - 2.1.3.1. Geovisualización y visualización científica
 - 2.1.3.2. Geoinformación y redes sociales.
 - 2.1.3.3. Cartografía Multimedia, Interactividad y animación
 - 2.1.3.4. Visualización de información temática en 3D y en realidad virtual

2.2. El tratamiento de la información geográfica.

- 2.2.1. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- 2.2.2. El análisis de la información geográfica:
 - 2.2.2.1. Análisis local: Reclasificación y superposición
 - 2.2.2.2. Análisis de vecindad inmediata.
 - 2.2.2.3. Análisis de vecindad extendida.
 - 2.2.2.4. Análisis zonal.

2.3. Aplicaciones de los SIG en los proyectos de planificación territorial y urbana

- 2.3.1. La gestión de redes de infraestructuras urbanas
- 2.3.2. Aplicaciones en la Gestión Urbanística.
- 2.3.3. Los SIG en las etapas de un proyecto de planificación.

2.4. El marco legal.

- 2.4.1. Las directivas europeas INSPIRE y SEIS.
- 2.4.2. La ley Lisige, el Instituto de Estadística y Cartografía y el plan cartográfico de Andalucía 2009-2012.
- 2.4.3. El cambio de sistema de referencia geodésico oficial en España.
- 2.4.4. Las infraestructuras de datos espaciales (IDE). Servidores OGC.

2 BASES PARA UNA NUEVA LECTURA FÍSICA DEL TERRITORIO Y SU REPRESENTACIÓN.

“Los padres sensatos dan a sus hijos raíces y alas; y también un mapa”. Antiguo proverbio chino.

2.1. Los avances en la lectura y comprensión del territorio.

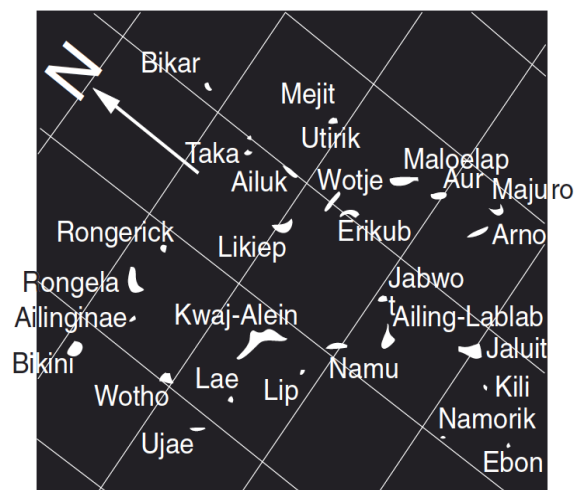
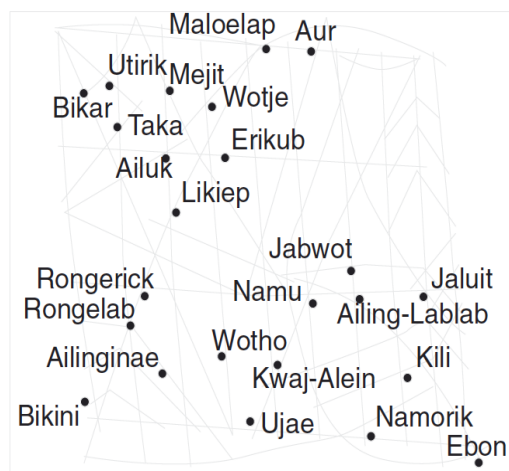
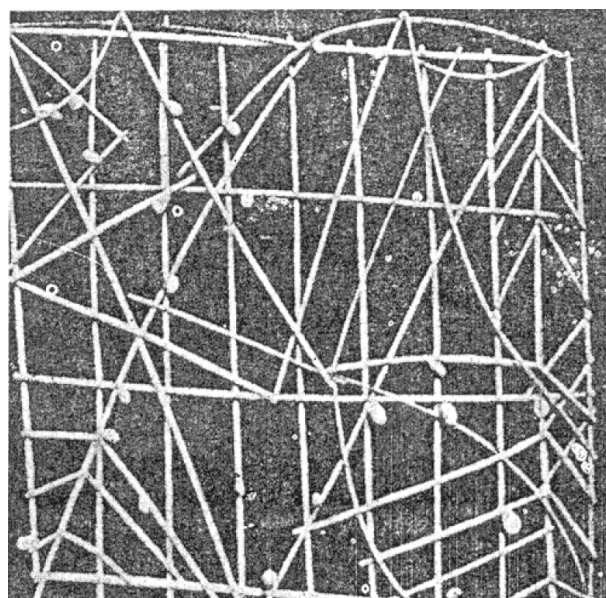
En la actualidad el desarrollo tecnológico y la revolución técnica asociada a éste, afecta al desarrollo de todas ciencias, entre ellas a las relacionadas con el territorio, y la Cartografía no se ha quedado al margen. La aparición de herramientas informáticas cada vez más potentes y la utilización de nuevos medios de comunicación, ponen de manifiesto en la actualidad, y permite vislumbrar en el futuro, cambios significativos en el desarrollo de los paradigmas que hasta ahora han marcado el trabajo cartográfico.

La necesidad de comprender su entorno, de representar el territorio para poder entenderlo, es una aspiración del hombre desde los albores de la humanidad.

La aparición de los mapas se produjo antes de la historia, con anterioridad a la aparición del relato escrito, y se utilizaron para establecer distancias, recorridos, localizaciones... y así poder desplazarse de unos lugares a otros. Los mapas más antiguos que existen fueron realizados por los babilonios hacia el 2300 a.C. Estos mapas estaban tallados en tablillas de arcilla y consistían en su mayor parte en mediciones de tierras realizadas con el fin de cobrar los impuestos. También se han encontrado en China mapas regionales más extensos, trazados en seda, fechados en el siglo II a.C.

Y es que, al parecer, la habilidad y la necesidad de hacer mapas son universales. Uno de los mapas primitivos más interesantes es la carta geográfica realizada sobre una entramado de fibras de caña por los habitantes de las islas Marshall, en el sur del océano Pacífico, dispuestas de modo que muestran la posición de las islas y los flujos predominantes (mareas) (Figura 2.1).

FIGURA 2.1.



Otros autores como Robinson, Docci o Ruiz Morales, comentan como primer ejemplo singular el mapa encontrado en Nippur en una tablilla cerámica, que se data hacia el 1500 a.C. (Figura 2.2). En Mesopotamia se han encontrado otros ejemplos de representación del terreno, tanto de ciudades como de campos de cultivo e incluso, ríos y cordilleras, y en soportes diversos: tablillas cerámicas o piedra esculpida. Todo ello indica tener desarrollada una capacidad simbólica para poder relacionar correctamente un entorno real y su representación en dos dimensiones mediante el uso de convenciones gráficas.



FIGURA 2.2.

Docci da ejemplos de transcripciones egipcias en papiro de terrenos, jardines y campos cultivados. A menor escala, al nivel de representación del territorio, entre los griegos se cita a Dicearco de Mesenia, que realizó un primer mapa del Mediterráneo donde aparece la línea diagrama de oeste a este y otra perpendicular como antecedentes de la medida por longitud y latitud y a Eratóstenes de Cirene, (194 a.C.) que fue director de la Biblioteca de Alejandría y que realizó un mapa del mundo.



FIGURA 2.3.

Entre las aportaciones romanas, tenemos la Forma Urbis Romae (Figura 2.3), un mapa completo de la ciudad de Roma, de principios del S. II d. C., esculpido en placas de mármol de las que se han recuperado abundantes fragmentos, a escala 1:240, en los que se comprueba el uso por parte de los trazadores de numerosos símbolos y convenciones gráficas para representar, tabiques, muros, puertas, escaleras, etc.

Los cartógrafos, a lo largo de los siglos, han utilizado diferentes recursos gráficos para representar en el plano el relieve del terreno, las construcciones, o la hidrología, en un intento por reproducirlos con la mayor fidelidad posible. La historia de la cartografía está unida, por tanto, a la historia de la invención, descubrimiento, asimilación y adaptación de códigos e ingenios gráficos aplicados al dibujo de esos elementos (San Antonio, 2000).

Los cartógrafos han tratado de descubrir y desarrollar recursos o convenciones gráficas que permitieran transmitir información fidedigna tanto del significado de lo representado como de su forma. Dado este fin, hacia él se orientan y ajustan todas las convenciones gráficas, que necesariamente deben tener un alto grado de abstracción y codificación.

Se muestran a continuación algunos de los recursos gráficos que han ido apareciendo a lo largo de la historia de la cartografía, tanto para representar el relieve del terreno como la arquitectura, la ciudad, o las obras públicas civiles y militares. (según clasificación de Ruiz, 2001 y recopilación de imágenes de San Antonio, 2000)

• Relieve del terreno:

El procedimiento más antiguo para representar el relieve son los perfiles abatidos (Figura 2.4). Se dibujan figuras convencionales, simulando perspectivas superpuestas tomadas desde un punto. Las montañas se dibujaban abatidas, como vistas hacia arriba desde el valle. Este método, aparece ya en los primitivos mapas babilonios, allá por el siglo XXV a.d.C.

La perspectiva aérea o vista de pájaro, es el intento más claro de simulación de la realidad. Con ella se consigue representar la profundidad, logrando una convincente sugestión del espacio en el que se sitúan las formas según su tamaño y posición, afectadas por las condiciones de color, textura o luminosidad (Figura 2.5).

El procedimiento de puntos acotados (Figura 2.6) se ha utilizado, casi exclusivamente, en los mapas marítimos debido básicamente al espacio disponible. En los planos topográficos, los únicos puntos acotados que se han conservado tienen el papel secundario de facilitar la identificación de las cotas de las curvas de nivel y de señalar la altitud de puntos destacables de la orografía (cimas, picos, etc.) y de la planimetría (pasos a nivel, encrucijadas, etc.).

Si se pudiera descomponer la superficie del terreno en un número determinado de superficies planas, a modo de superficie poliédrica, cuyas aristas, intersección de planos contiguos, constituirían las líneas estructurales (Figura 2.7). Se trata de la representación de valles y crestas, acompañada de las cotas de sus puntos de intersección.

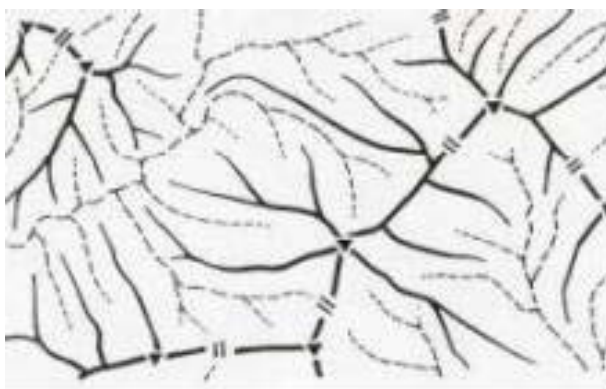


FIGURA 2.4.

FIGURA 2.5.

FIGURA 2.6.

FIGURA 2.7.



Los sombreados se aplicaba en los mapas dibujados en perspectiva, con la luz desde una dirección incidiendo en las montañas y la sombra correspondiente, lo que producía una percepción de su relieve. En los mapas, por lo general iluminados en colores a la acuarela, se conseguían las sombras por manchas de color más o menos oscuras según la orientación y la pendiente estimada de las laderas. (Figura 2.8)



Las líneas de máxima pendiente suelen partir de las divisorias y dirigirse a las vaguadas. Permiten, alcanzar efectos de sombreado, juntándolas más o menos o engrosando sus trazos, pero sin tener en cuenta las reglas de la iluminación oblicua. Este sistema no refleja ni las formas reales del terreno, ni las diferencias de altitud, ni el valor de las pendientes. (Figura 2.9)



El paso definitivo para representar geoméricamente el relieve del terreno consistió en convertir las curvas de configuración horizontal en curvas de nivel añadiéndoles su correspondiente cota (Figura 2.10). Estas líneas se denominan de profundidad, batimétricas o isobatas en el caso de que se encuentren en fondos lacustres o marinos.



En el s. XIX, en las minutas de un mapa se dibujaban las curvas de nivel, que servían de pauta al grabador para trazar las líneas de máxima pendiente en las planchas de impresión, sin grabar aquellas. Las líneas de máxima pendiente quedaban así definidas por trazos normales a cada par de curvas de nivel consecutivas, y representaban las líneas de mayor pendiente de un terreno (Figura 2.11).

FIGURA 2.8.
FIGURA 2.9.
FIGURA 2.10.
FIGURA 2.11.

• Representación de la hidrología:

El mar, en las cartas y mapas, se ilumina en tonos azules, verde claro e, incluso, beige. Las olas batiendo en la costa, en el color elegido con tono más intenso. (Figura 2.12)

Las playas se suelen representar con un punteado gris o negro. (Figura 2.13)

Los acantilados se dibujan en los planos históricos de diversas formas según la imaginación del cartógrafo. A veces con una especie de rayado y otras, con manchas en color más intenso que simula el relieve. (Figura 2.14)

Los ríos se representan igualmente de muy diferentes formas, desde un par de líneas en color azul, hasta otras representaciones más sofisticadas como la que se adjunta, donde se dibujan islas y puentes. (Figura 2.15)

La simbología con la que se representan los lagos es muy parecida a la del mar. Normalmente prima la entonación en azul. (Figura 2.16)

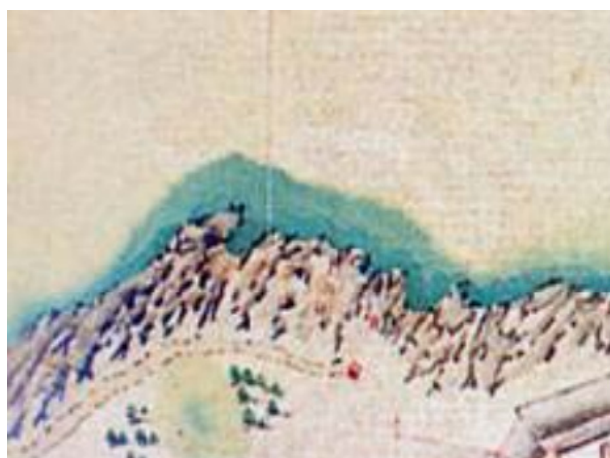


FIGURA 2.12.
FIGURA 2.13.
FIGURA 2.14.
FIGURA 2.15.
FIGURA 2.16.





• **Representación del mundo vegetal:**

Bosques (Figura 2.17)

La dificultad para representar los bosques resulta evidente. No se suele recurrir a representar masas arbóreas, sino árbol a árbol en perfil abatido.

Tierras de labor (Figura 2.18)

Las tierras de labor se suelen dibujar formando figuras trapezoidales que indican la división de la tierra. Se pueden rayar o también rellenar de color.



FIGURA 2.17.

FIGURA 2.18.

• **Representación de la arquitectura:**

Proyección ortogonal: Planta (Figura 2.19)

Los dibujos más antiguos que se conservan son esquemas de plantas y perfiles abatidos o alzados. La arquitectura, las personas y los animales, en alzado; y los árboles que la rodean, también en alzado, pero abatidos en el lado correspondiente. Esta manera de representar ofrece la máxima información con los mínimos recursos gráficos.



Proyección ortogonal: Alzado (Figura 2.20)

En la historia de la cartografía, no solo la arquitectura, también las montañas, las personas, los animales y los árboles se han representado en alzado o perfil abatido.



FIGURA 2.19.

FIGURA 2.20.



El recurso de la perspectiva ha sido constante para representar la arquitectura y así completar la visión más abstracta de la planta y el alzado. La perspectiva paralela, en sus diferentes variedades, es un recurso casi intuitivo incluso para los no iniciados. La más fácil de dibujar es la perspectiva militar porque se parte de la planta de la edificación. (Figura 2.21)

De las perspectivas militares, una de las más usadas es la llamada “egipcia”, por tener el eje z ortogonal a la planta. (Figura 2.22)



Es difícil encontrar perspectivas isométricas en la representación de la arquitectura, por la dificultad de dibujar la planta con los ejes a 120° (San Antonio, 2000). Es más inmediata la militar que parte de la planta ortogonal. Los pocos casos que se conocen, no son perspectivas estrictamente isométricas aunque puedan percibirse como tales. (Figura 2.23)

La perspectiva cónica (Figura 2.24) es el recurso perspectivo más frecuente en la cartografía. Forma parte del grupo que se conoce como “vistas a vuelo de pájaro”.

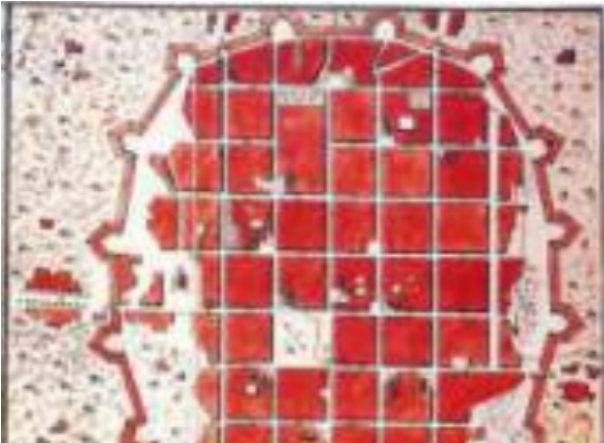


FIGURA 2.21.

FIGURA 2.22.

FIGURA 2.23.

FIGURA 2.24.



• **Representación de la ciudad:**

La planta de la ciudad representada en proyección ortogonal es el recurso gráfico más común y se remonta a las primeras civilizaciones (Figura 2.25).

En la historia de la cartografía ha sido una constante representar las ciudades “a vista de vuelo de pájaro”. En estos caso, el caserío se confunde con los edificios singulares: catedral, iglesias, castillo, palacios..., formando un todo abigarrado (Figura 2.26).



Un caso especial de ciudades representadas “a vista de vuelo de pájaro”, es cuando las edificaciones se dibujan en perspectivas paralelas frontales hechas, con más o menos acierto, que podrían calificarse de caballerías y militares. (Figura 2.27)

Un caso particular de ciudades dibujadas en perspectiva paralela frontal, es el de la perspectiva militar con el eje z vertical (Figura 2.28). La de eje z oblicuo es menos frecuente (Figura 2.29).



De perspectivas isométricas construidas en forma empírica, mucho antes de la sistematización de Willian Farish, se pueden encontrar diversos ejemplos. (Figura 2.30)

Además de la representación de ciudades “a vista de vuelo de pájaro”, en perspectiva paralela caballera o militar, se conservan muchísimos ejemplos que siguen las reglas de la perspectiva lineal con mayor o menor rigor. (Figura 2.31)

FIGURA 2.25.

FIGURA 2.26.

FIGURA 2.27.

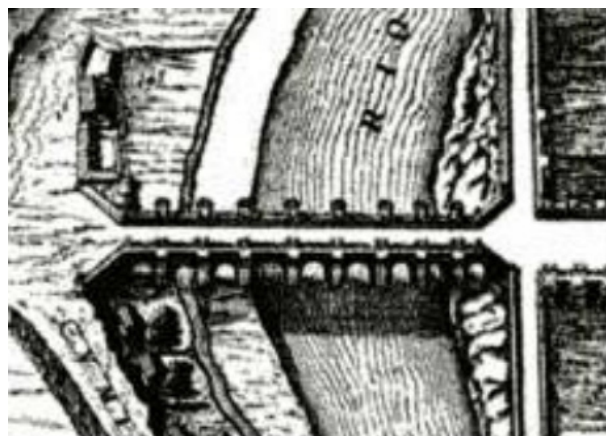


FIGURA 2.28.
FIGURA 2.29.
FIGURA 2.30.

FIGURA 2.31.
FIGURA 2.32.
FIGURA 2.33.

• **Representación de las obras públicas civiles y militares:**

Los caminos se suelen dibujar a sentimiento con doble línea (Figura 2.32).

Los puentes se tienden a representar en perspectiva militar o en perfil abatido. No es infrecuente que se dibuje su planta (Figura 2.33).

No es muy frecuente que aparezcan representadas las presas, pero en cualquier caso siempre se busca la ilustración de realidad a través del dibujo de las apariencias (Figura 2.34).

Los canales se suelen representar como los ríos, pero en mapas más modernos, como el de la figura adjunta del siglo XVIII, se dibujan en planta (Figura 2.35).

Puertos (Figura 2.36)

Se representan con su dique o espigón. El mar y el relieve del terreno se dibujan como dijimos anteriormente.

Fortificaciones (Figura 2.37)

Son frecuentes las representaciones de las fortificaciones, con su característica forma estrellada, desde el Renacimiento hasta el siglo XIX.

En la actualidad la cartografía se nutre de una serie de importantes avances e innovaciones técnicas que podrían comenzar con la fotografía aérea, desarrollada

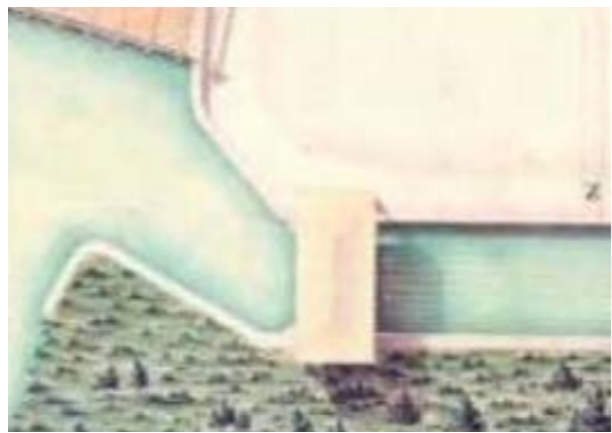
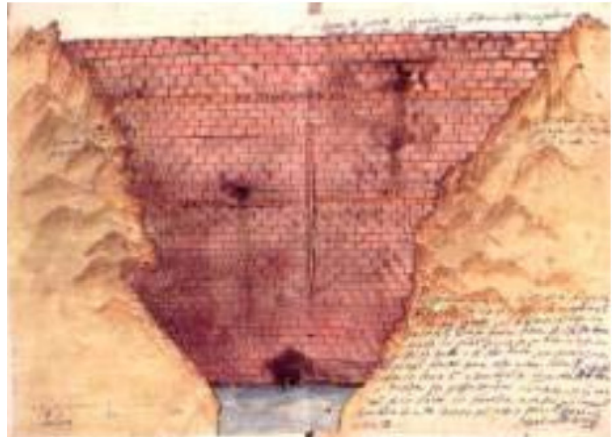


FIGURA 2.34

FIGURA 2.35

FIGURA 2.36

FIGURA 2.37

durante la I Guerra Mundial y desarrollada durante la segunda, o con el lanzamiento en 1966 del satélite Pageos y durante la década de los 70 de los Landsat, y en general del desarrollo de las técnicas y de sus aplicaciones, desde la recogida y almacenamiento de la información hasta su tratamiento (análisis y modelización).

La indudable influencia de las herramientas informáticas en nuestra sociedad se han dejado sentir en el desarrollo actual de la cartografía, convirtiéndose en un instrumento fundamental en los trabajos cartográficos, ya que además de las posibilidades de almacenar grandes cantidades de información, permite una constante actualización de ésta, así como la rapidez en la elaboración de, entre otros, mapas de series temporales que, como veremos más detalladamente en el capítulo séptimo, permiten la explicitación precisa de la evolución de hechos a lo largo del tiempo.

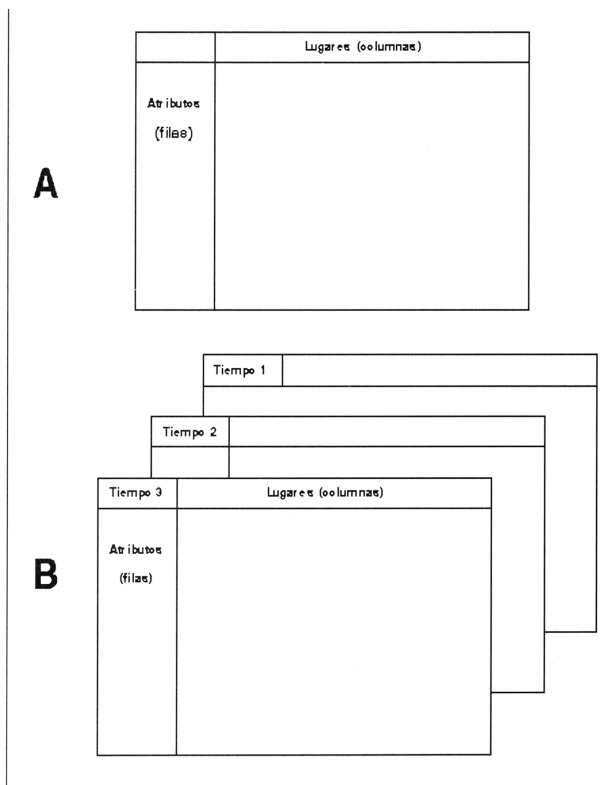


FIGURA 2.38

2.1.1. La información digital en la representación del territorio.

Desde un punto de vista geográfico, podemos decir que el “mundo real” se encuentra constituido por infinidad de elementos diferentes. Basta observar cualquier paisaje o fotografía aérea para identificar infraestructuras lineales, zonas agrícolas, cursos de agua, torretas de comunicaciones, edificios aislados, zonas urbanas, etc. Todos estos elementos se pueden identificar como entidades del mundo real.

Por otra parte, los sistemas informáticos necesariamente operan con datos. Esto implica que para poder trabajar con las diferentes entidades que componen esta realidad, sea necesario recurrir a procesos de modelización de datos que simplifiquen dicha realidad y entidades del mundo real y que nos permitan tener entidades espaciales manejables informáticamente.

La información geográfica tiene características únicas, y su recolección, compilación y análisis presenta problemas únicos: la realidad representada por la información geográfica es frecuentemente continua y siempre infinitamente compleja, por lo que tiene que ser “discretizada”, abstraída, generalizada o interpretada para su posterior tratamiento y análisis (Gutierrez y Gould, 1994).

Crear un mapa implica simplificar lo complejo, discretizar lo abstracto.

Los geógrafos y otros profesionales de las ciencias de la tierra han trabajado siempre con mapas y con información espacial, pero fue en los años sesenta, en plena revolución cuantitativa, cuando se produjo un período de reflexión acerca de los datos espaciales y su tratamiento cuantitativo.

En este sentido resulta decisiva la aportación de Berry (1964) quien, consciente de la especial naturaleza de la información geográfica y de las limitaciones que existían para trabajar con mapas analógicos, propuso una matriz geográfica, en la que se conectaban las unidades espaciales con sus atributos temáticos. (Figura 2.38)

En esa matriz, contrariamente a lo que estamos acostumbrados en las bases de datos actuales, las columnas

eran los lugares o individuos geográficos (por ejemplo, municipios) y las filas los atributos de esos lugares (por ejemplo, su población, superficie, etc.) (Figura 2.39).

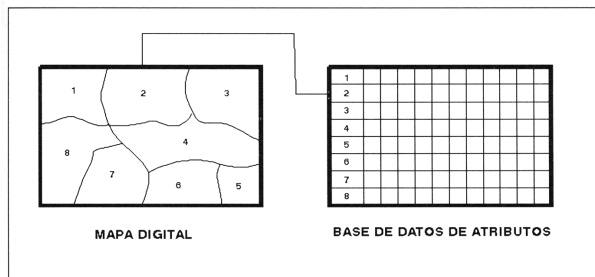


FIGURA 2.39

La principal ventaja que ofrecía una matriz de estas características era el poder tratar cuantitativamente la información temática asociada a los lugares. En realidad la mayor parte de las operaciones que se llevaban a cabo en la Geografía tradicional se podrían abordar en la matriz de forma cuantitativa. Así, por ejemplo el examinar una fila no es más que analizar la variación espacial de una variable (lo que equivale a analizar un mapa temático) y el comparar dos filas entre sí supone analizar la covariación espacial de dos variables (en la práctica, comparar dos mapas temáticos).

Una matriz de estas características presentaría el inconveniente de no considerar el eje del tiempo, aspecto clave en los estudios territoriales y que será objeto del resto del documento. Para tratar los procesos espacio-temporales, Berry introdujo en su matriz una nueva dimensión en la que se representaba el tiempo (Figura 2.40).

Así se podía disponer de una información temporalizada, de manera que era posible estudiar la "geografía histórica de una región" a través de distintos cortes transversales en el eje del tiempo. Pero además se podían realizar análisis longitudinales para estudiar, por ejemplo, la evolución en el tiempo de una unidad espacial (columna), de una variable (fila) o de la covariación espacial entre dos variables (dos filas).

Dangermond sugirió en 1983 una variación en el esquema original de Berry, de forma que los datos de localización

son incluidos junto a los atributos en la matriz tridimensional, Así se puede conocer no sólo los atributos de cada elemento espacial, sino también su localización precisa en el espacio (Figura 2.41).

Este paso es fundamental, por cuanto de los datos de localización se pueden deducir ciertas propiedades y relaciones espaciales. Por lo demás, los atributos aparecen ahora en las columnas y no en las filas, como es habitual en cualquier base de datos.

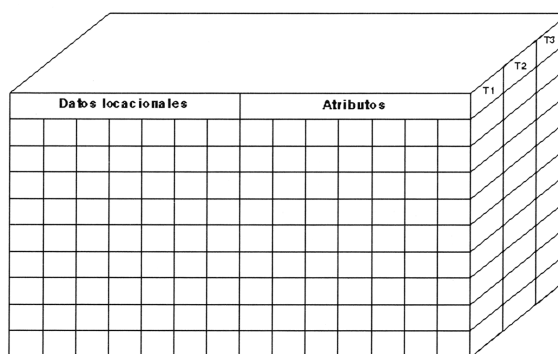
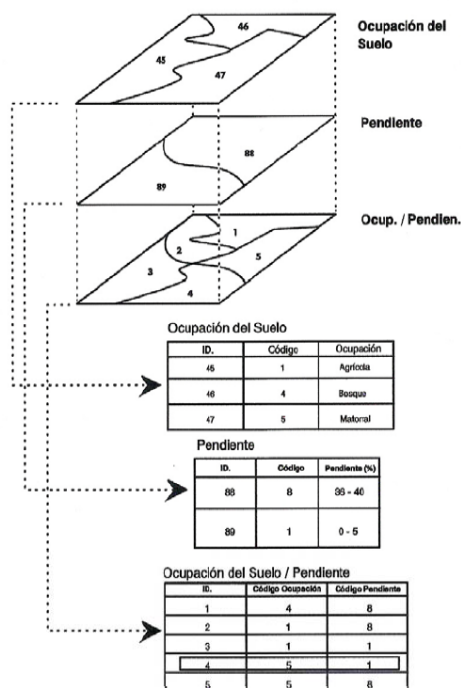


FIGURA 2.40



2.1.1.1. Las componentes espacial, temática y temporal

Hoy se acepta de forma general que los datos geográficos presentan tres componentes: una componente espacial (localización), una componente temática (atributos) y una componente temporal (tiempo). Son las viejas preguntas de *dónde, qué y cómo, y cuándo*.

La componente espacial hace referencia tanto a la localización geográfica (es decir su ubicación geográfica determinada por un sistema de coordenadas) y a las propiedades espaciales de los objetos, como a las relaciones espaciales que existen entre ellos (interrelaciones espaciales geométricas o topológicas con otros elementos).

La localización geográfica o posición de los objetos en el espacio se expresa mediante un sistema de coordenadas, que debe ser el mismo para las distintas capas o estratos de información con los que se representa el área de estudio.

Los objetos espaciales mantienen ciertas relaciones entre sí basadas en el espacio. Se trata de un número elevado de relaciones (como conectividad, contigüidad, proximidad, etc.). Algunas están explícitamente definidas, otras pueden ser calculadas cuando son requeridas o sencillamente no están disponibles.

Existe una diferenciación entre relaciones topológicas (de tipo cualitativo) y relaciones geométricas (calculadas a partir de las coordenadas de los objetos). Al cambiar la proyección de un mapa, las relaciones geométricas entre objetos se modifican (como por ejemplo, las distancias medidas sobre el mapa), pero en cambio las relaciones topológicas se mantienen (por ejemplo, la contigüidad).

Un ejemplo ilustrativo para diferenciar entre relaciones topológicas y geométricas es el de los mapas esquemáticos de las redes de metro: las relaciones geométricas no se respetan, ya que el trazado de las líneas y la localización de las estaciones no se corresponde con la realidad (para mayor simplificación), pero las relaciones topológicas (la conectividad de los distintos tramos de las líneas) permanecen inalteradas.

La topología expresa las relaciones entre objetos de for-

ma cualitativa: si dos polígonos son colindantes (contigüidad), si uno está contenido en el otro (inclusión), si dos líneas están conectadas (conectividad), etc.

La topología es relevante también en nuestro comportamiento diario en el mundo real. Como señala Frank (1990), los seres humanos tenemos distintas formas de conceptualizar el espacio. Para realizar ciertos cálculos espaciales utilizamos la geometría euclidiana, pero a la hora de realizar un desplazamiento no nos guiamos por coordenadas geográficas, sino por relaciones topológicas. Cuando nos desplazamos a un punto dado en el espacio, raramente conocemos las coordenadas de ese punto (su georreferenciación absoluta): lo que nos orienta generalmente es su posición relativa, expresada de forma cualitativa, con respecto a algún elemento conocido, localizado en nuestro mapa mental. Indicaciones del tipo, *"junto al Ayuntamiento"* o *"en el campus universitario"* son ilustrativas de este tipo de relaciones.

Existen relaciones espaciales entre objetos del mismo tipo y entre objetos de distinto tipo. Supongamos que tenemos un mapa digital en el que las paradas de autobús se representan mediante puntos y los bloques de viviendas mediante polígonos. A partir de una parada dada se puede conocer cuál es la parada más próxima a ella, pero también cuáles son los bloques de viviendas que se encuentran a menos de una determinada distancia de esa parada (cerca de) y a partir de esta relación calcular cuál es la población servida por dicha parada.

Las relaciones espaciales entre objetos son muy importantes. En este punto conviene tener en cuenta que estos elementos representan un espacio concreto, el espacio geográfico en el que habita el hombre. Así, por ejemplo, el riesgo potencial que produce un depósito de combustibles situado cerca de un edificio residencial está en función de la proximidad entre ambos. Esta relación espacial de proximidad entre ambos objetos es importante en tanto que se refiere a objetos que representan entidades del espacio geográfico.

Es difícil hacer una relación exhaustiva de relaciones espaciales. Frank y Mark (1991) recogen distintas relaciones espaciales fundamentales que pueden ser enumeradas de la siguiente forma:

1. A la derecha de

2. A la izquierda de
3. Junto a
4. Encima de
5. Debajo de
6. Detrás de
7. Delante de
8. Cerca de
9. Lejos de
10. Tocando con
11. Entre
12. Dentro de
13. Fuera de
14. Al norte de
15. Al sur de
16. Al oeste de
17. Al este de

Sobre estas relaciones espaciales fundamentales pueden construirse otras más complejas, como ocurre por ejemplo con la conectividad. Así, por ejemplo, dos líneas pueden no tocarse directamente, pero estar conectadas indirectamente a través de una tercera, etc.

En cuanto a la **componente temática**, los objetos con los que representamos el mundo real poseen unas determinadas características que se conocen como atributos (o variables). Así, cada objeto registra un determinado valor para cada uno de los atributos considerados.

Los valores temáticos tienden a ser más parecidos entre objetos próximos en el espacio que entre objetos situados lejos los unos de los otros. Este principio general, conocido como **autocorrelación espacial**, implica la existencia de un cierto orden en el espacio. Como señaló Hurriboldt en alusión a los fenómenos naturales, lejos de producirse cambios bruscos (a saltos) en el espacio, en la realidad tienden a producirse gradaciones más o menos suaves. Este principio parece cumplirse no sólo en las variables de tipo físico, sino también en las de tipo humano.

El relieve terrestre, las precipitaciones y las temperaturas, por un lado, y las densidades de población y las disparidades de renta, por otro, constituyen buenos ejemplos al respecto: si tomamos un determinado punto del mapa como referencia, observaremos que los valores temáticos de la variable considerada tienden a modificarse gradualmente a medida que nos alejamos de él.

Los valores temáticos no sólo cambian en el plano del espacio, sino también en el eje del tiempo. Y, al igual que ocurre sobre el espacio, los cambios que se producen en el eje del tiempo tienden a ser graduales. Este principio es conocido como **autocorrelación temporal**, y hace alusión a que los datos próximos en el tiempo tienden a ser más parecidos entre sí que los más lejanos.

Aplicando esta idea a una secuencia de mapas de densidades de población de una determinada zona, resultará que los cambios que se producen entre dos fechas próximas serán pequeños, pero irán aumentando a medida que aumente el intervalo de tiempo comprendido entre las fechas de los dos mapas. Dicho de otra forma: las distribuciones espaciales se modifican paulatinamente a lo largo del tiempo, de manera que cabe esperar cambios tanto mayores, cuanto mayor sea el tiempo transcurrido.

Tipos de variables y escalas de medida

Las variables que constituyen la información temática de las unidades espaciales pueden ser de distinto tipo y estar medidas en distintas escalas. Este es un hecho importante que afecta tanto a la generación de mapas como al tipo de análisis que se puede efectuar con esa información.

Las variables se pueden tipificar atendiendo básicamente a dos criterios:

- Variables continuas y variables discretas. Atendiendo a los valores que pueden tomar, se distinguen dos tipos de variables: continuas o discretas. Las variables continuas pueden tomar cualquier valor entre dos valores dados. La superficie, por ejemplo, es una variable continua, ya que admite cualquier valor dentro de un determinado rango. En cambio, la población es una variable discreta, ya que sus valores sólo pueden ser números enteros, pero no decimales.

- Variables fundamentales y variables derivadas. Esta distinción hace referencia al proceso de elaboración de las variables. Las variables fundamentales son obtenidas directamente, mientras que las derivadas son el producto de alguna operación aritmética entre dos o más variables fundamentales. El número de habitantes, por ejemplo, es una variable fundamental, pero la den-

sidad de población (obtenida a través del cociente entre el número de habitantes y la superficie) es una variable derivada.

Conviene tener presente que a partir de variables fundamentales discretas se pueden obtener variables derivadas continuas. Así, por ejemplo, el número de llamadas telefónicas y el número de habitantes son dos variables fundamentales discretas, pero el número de llamadas por cada 1.000 habitantes es una variable derivada continua.

Es importante señalar dos cuestiones en relación a los tipos de variables. La primera es que basta con tener en la base de datos las variables fundamentales, ya que las derivadas se pueden calcular con facilidad dentro del sistema. La segunda es que los valores de las variables discretas pueden almacenarse como números enteros, lo cual supone un menor consumo de espacio en la memoria del ordenador, mientras que los valores de las variables continuas generalmente deberán ser almacenados como números reales, que requieren más memoria.

Por lo que se refiere a las escalas de medida, se pueden diferenciar las siguientes:

- Escala nominal. Se establece simplemente una diferenciación, una clasificación de las unidades espaciales en categorías o clases. No se trabaja propiamente con valores numéricos, sino nominales, es decir, con nombres. Así, las unidades espaciales que presentan el mismo valor nominal se incluyen en la misma categoría. Es lo que ocurre cuando clasificamos a los municipios según la provincia en que se encuentren: todos los municipios de la provincia de Granada se incluyen en la categoría “Granada” y así sucesivamente. Cada municipio registra un valor “nominal”, un nombre o etiqueta (por ejemplo “Granada” o “Málaga”).

Un caso especial en la escala nominal lo constituyen las variables dicotómicas, en las que sólo se admiten dos posibilidades, por ejemplo, presencia o ausencia (por ejemplo, si un municipio tiene o no tiene escuela primaria).

- Escala ordinal. No sólo se establece una diferenciación (como en las variables ordinales), sino también una jerarquización, un orden jerárquico entre las distintas unidades espaciales. Es lo que ocurre siempre que apa-

rece un “ranking” (por ejemplo, el puesto que ocupan los municipios atendiendo a su renta per cápita).

- Escala de intervalo. La escala de intervalo no sólo establece una diferenciación y una jerarquización, sino que además indica la distancia que existe entre las distintas unidades espaciales. Para medir esa distancia es necesario establecer una escala sobre la que cada unidad espacial debe registrar un valor.

Una variación de la escala de intervalo es la escala de razón o proporción. También establece una diferenciación, jerarquización y distancia entre unidades espaciales, pero tiene la particularidad de que la razón de dos valores cualesquiera es independiente de la unidad de medición. Así, si tomamos como referencia un municipio determinado, resulta que si su vecino tiene dos veces más renta per cápita que él, lo hará independientemente de que la renta se expresa en pesetas o en euros.

Las variables que están en escala de intervalo se denominan cuantitativas (por llevar asociado un valor numérico), mientras que las que se encuentran en escala nominal reciben el nombre de cualitativas (ya que en este caso sólo se especifica la pertenencia a una categoría mediante una etiqueta o carácter no numérico).

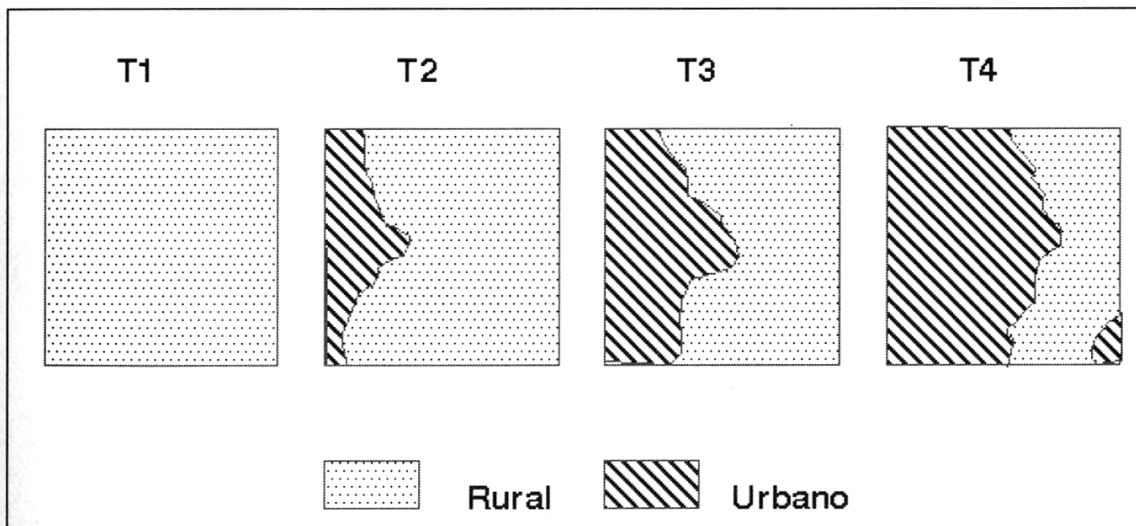
Nos referimos a la **componente temporal** en cuanto a que las distribuciones espaciales se van modificando con el curso del tiempo. Un mapa de usos del suelo actual presenta ciertas diferencias con respecto a otro de la misma región unos años antes y así sucesivamente a medida que vamos retrocediendo en el tiempo, de manera que tenemos un mapa para cada momento temporal (Figura 2.42): las manchas de uso urbano se han expandido a costa del espacio rural, es decir, se ha producido un cambio en los elementos geográficos. Esta forma de tratar el tiempo como una secuencia de instantáneas es fácilmente comprensible y resulta muy expresiva para mostrar los procesos espacio-temporales. Recuerda a una película en la que se proyecta una secuencia de fotografías con gran rapidez. La sensación de movimiento estará más lograda cuanto mayor sea el número de fotografías.

Así pues, el tiempo lleva asociada la idea de cambio. Ese cambio puede afectar exclusivamente a la componente temática, sin que se modifique la componente espacial. Esto sucede cuando, al comparar dos mapas correspon-



1• FIGURA 2.42

2• FIGURA 2.43



dientes a dos momentos temporales, los contornos de los objetos son los mismos y sólo ha cambiado el valor temático de alguno de ellos (por ejemplo, se ha transformado una parcela y su valor temático pasa de seco a regadío).

Pero los cambios habitualmente también afectan a la componente espacial: pueden crearse nuevos elementos en el mundo real, que deben ser representados mediante nuevos objetos en el SIG (como ocurre entre T1 y T2 en la Figura 2.43) o simplemente pueden modificarse los contornos de los elementos existentes, en el sentido de que uno crece a costa del otro (como ocurre entre T2 y T3 en esa misma figura), lo que obliga a redefinir la geometría de los objetos que representan esos elementos.

Las formas más comunes de representar los procesos espacio-temporales son las siguientes:

- Secuencia de mapas. Ello equivale a una sucesión de instantáneas referidas a determinados momentos temporales. Es lo que se hace, por ejemplo, cuando se quiere presentar la evolución del uso del suelo de una región (Figura 2.44). Sin embargo, las capacidades de los SIG actuales para mostrar secuencias de mapas son muy reducidas.
- Mapa de diferencias temporales. Se trata de expresar las diferencias entre dos momentos temporales para las distintas unidades de observación. Ello es posible tanto cuando se trabaja con variables cuantitativas (por ejemplo los cambios en la precipitación anual entre dos años) como cuando se trabaja con variables nominales (cambios en los usos del suelo entre dos años dados).
- Mapa animado. En una animación es necesario incluir una gran cantidad de cortes temporales para hacer más suave el paso de un mapa a otro, de la misma forma que una película necesita muchos fotogramas. Pero para que ese paso entre mapa y mapa sea suave no basta con que el número de cortes temporales sea alto, sino que además la variable en cuestión debe presentar una alta autocorrelación temporal. Los mapas animados son enormemente expresivos a la hora de mostrar procesos espacio-temporales, ya que permiten seguir la dinámica espacial de forma casi continua en el tiempo. Hoy la generación de mapas animados es más fácil que nunca debido a la disponibilidad de imágenes de satélite obte-

nidas de forma periódica (diaria en el caso por ejemplo del satélite NOAA).

2.1.1.2. Modelos de datos. Bases de datos espaciales

El mundo real es enormemente rico y variado. Cada analista o investigador se propone un objetivo en su estudio, que sólo puede ser alcanzado mediante una simplificación de la realidad, mediante un modelo. En esa tarea es necesario ser selectivos: no se puede ni se debe representar toda la realidad en toda su complejidad, sino que hay que aislar aquellos elementos y relaciones del mundo real que son útiles para los propósitos del estudio que se aborda. Un modelo más complicado (con más elementos y relaciones) no es necesariamente mejor, pero indudablemente supone un aumento del coste del estudio.

Tradicionalmente se distinguen dos aproximaciones básicas a la cuestión de cómo modelizar el espacio, según se atiende a las propiedades o a la localización (Bosque, 1997) de las que resultan dos modelos de datos: vectorial y raster.

- En la aproximación raster la individualización de las unidades se realiza atendiendo a un criterio posicional: se trabaja con unidades artificiales que se corresponden con celdas de igual tamaño y forma, obtenidas mediante la superposición de una malla regular sobre el área de estudio. El espacio enmarcado por cada una de esas celdas constituye la unidad de observación para la que se recoge, en distintas capas, la información temática: litología, vegetación, suelos... Así, se puede seleccionar cualquiera de esas celdas y conocer qué tipo de rocas, vegetación y suelos existe en la porción del espacio que representa. El hecho de que las distintas capas tengan la misma distribución regular de celdas hace que ajusten sin ningún problema (ajuste perfecto), lo que facilita las operaciones de superposición de mapas. En este sentido se dice que en el enfoque raster la atención se centra en la componente temática, ya que los límites de las celdas son artificiales, están sobrepuestos a la realidad.
- En la aproximación vectorial, en cambio, habitualmente se considera que existen unidades individualizadas en el espacio geográfico en tanto que poseen determinadas propiedades: es lo que se conoce como entidades del mundo real, que pueden ser naturales (un manantial, un

lago, un río) o artificiales (una carretera, un polígono industrial, una urbanización). La representación de esas entidades se realiza por medio de los elementos geométricos básicos (puntos, líneas y polígonos) utilizados en la cartografía tradicional. (Figuras 2.44 y 2.45). Los objetos no son más que representaciones digitales de las entidades. La diferenciación entre estos tipos de objetos es puramente topológica:

- Los puntos son objetos espaciales de 0 dimensiones: tienen una localización en el espacio, pero no tienen ni longitud ni anchura. Se puede representar mediante puntos cualquier elemento cuyas dimensiones sean despreciables desde una perspectiva cartográfica: manantiales, pozos, semáforos, bocas de riego, etc.
- Las líneas son objetos espaciales de una dimensión, ya que tienen longitud, pero no anchura. Las líneas están definidas mediante una sucesión de puntos. Habitualmente se representan mediante líneas elementos que se integran en redes, ya sean naturales (como las redes hidrográficas) o artificiales (como las redes de carreteras).
- Los polígonos son objetos espaciales de dos dimensiones, ya que tienen longitud y anchura. Se representan mediante una sucesión de líneas que cierran (un anillo). Las parcelas del catastro o los lagos son buenos ejemplos de elementos que se representan como polígonos en las bases de datos.

La escala del mapa resulta fundamental en algunos casos a la hora de elegir un tipo de objeto para representar una entidad. Así, por ejemplo, una ciudad puede ser representada mediante un punto si se trabaja a escala 1:10.000.000, mediante un polígono si la escala es 1:200.000 o mediante un conjunto de polígonos si la escala es 1:25.000.

En cada capa de información vectorial, que solo contará con puntos, líneas o polígonos separadamente, se almacena información cartográfica y alfanumérica. Existen distintas formas de almacenar esas informaciones. La más clara a efectos expositivos es aquella en la que existe un fichero con información cartográfica (el mapa digital) y otro con información alfanumérica (la base de datos asociada) (Figura 2.46). Ambos ficheros están conectados, de manera que a cada uno de los objetos es-

paciales del mapa digital le corresponde un registro en la base de datos.

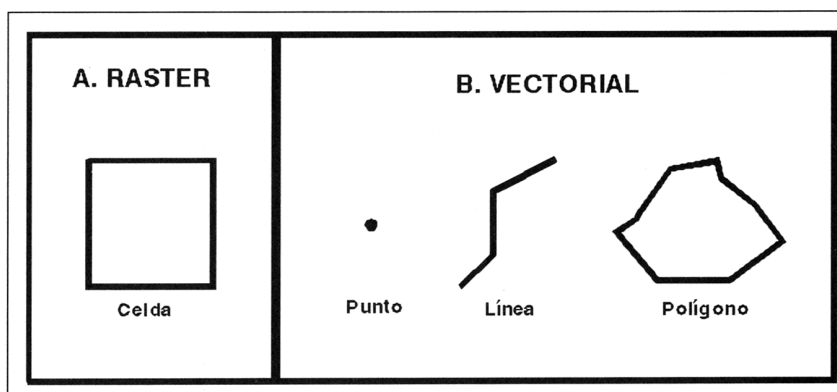
Esa conexión es posible gracias a que cada objeto del mapa digital y su correspondiente registro de la base de datos tienen un identificador común o clave. Si en el mapa digital señalamos un determinado objeto, a través de su identificador podemos conocer cuáles son los valores que registra ese elemento para los distintos atributos.

En la práctica las consultas se realizan en las dos direcciones: o bien seleccionando uno o varios objetos en el mapa digital para conocer la información que hay disponible sobre ellos en la base de datos (una consulta espacial o pregunta del tipo “QUÉ”) o bien seleccionando uno o varios registros sobre la base de datos para conocer la localización de los correspondientes objetos sobre el mapa (una consulta temática o pregunta del tipo “DÓNDE”).

Existen tres modelos clásicos de bases de datos (modelo jerárquico, modelo de red y modelo relacional), pero los dos primeros han caído en desuso ante las mayores ventajas que representa el modelo relacional.

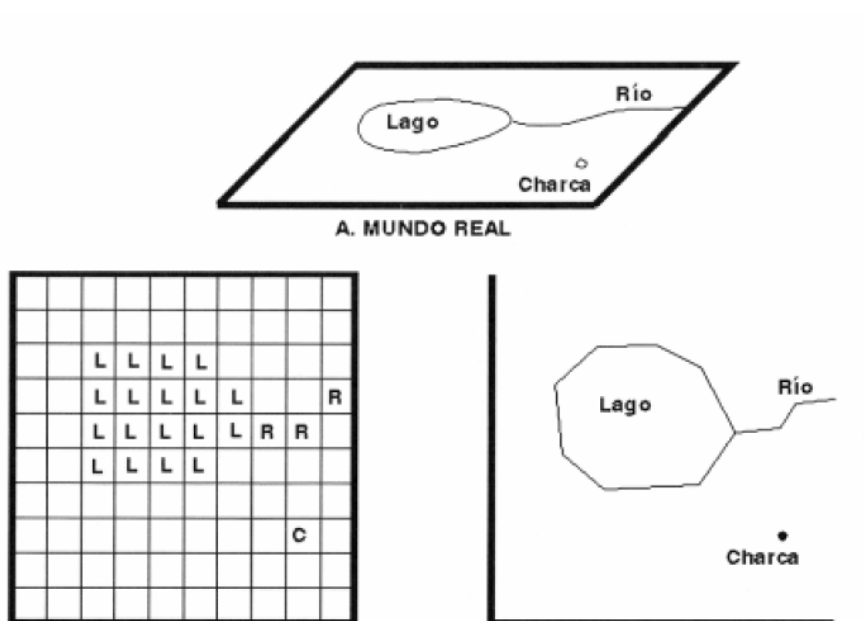
Las bases de datos relacionales surgen como consecuencia de los desarrollos realizados por IBM en la década de los sesenta, pero se generaliza este modelo en la década de los ochenta con la introducción de dBASE. En este modelo los datos se almacenan en tablas, en las que las filas, denominadas registros, corresponden a los distintos objetos y las columnas, denominadas campos, a los atributos de esos objetos. Cada registro contiene toda la información relativa a los atributos de un determinado objeto y para que ningún objeto esté repetido existe una columna que recibe el nombre de clave primaria o identificador. Éste permite no sólo diferenciar unos registros de otros, sino también conectar esa información con la existente en el fichero cartográfico para ese mismo objeto espacial. Las búsquedas se pueden realizar sobre una tabla en base a cualquiera de los atributos o sobre varias tablas utilizando atributos comunes.

Las principales ventajas del modelo relacional son su mayor flexibilidad frente a los otros modelos (en el sentido de que el usuario puede crear nuevas relaciones entre objetos en tiempo real), la simplicidad de la orga-



1• FIGURA 2.44

2• FIGURA 2.45



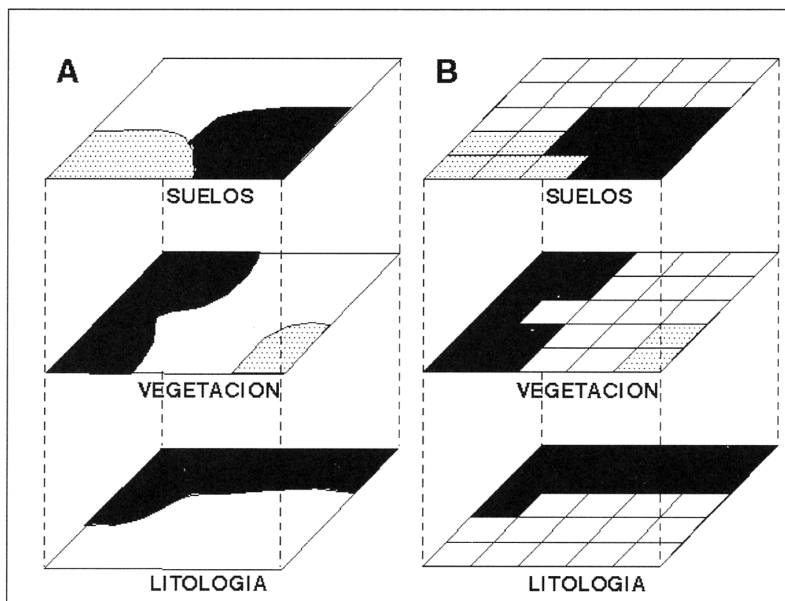


FIGURA 2.46

nización de los datos y la minimización de los niveles de redundancia. En contrapartida su principal desventaja estriba en que el tiempo de respuesta y el consumo de recursos tienden a ser mayor cuando es necesario relacionar varias tablas entre sí.

Actualmente la utilización de este sistema de bases de datos relacionales es generalizada, sin embargo va creciendo la tendencia a desarrollar SIG con bases de datos orientadas a objetos. No obstante, conviene señalar que otros sistemas utilizan el denominado modelo de datos integrado, en el que en una misma base de datos (generalmente relacional) se almacena, en ficheros distintos, la información cartográfica y la información relativa a los atributos. La información cartográfica y de atributos se gestiona con el sistema gestor de bases de datos, al que se añaden ciertos desarrollos para ejecutar funciones espaciales y gráficas. Actualmente, de la mano de la casa comercial Esri, se encuentra el modelo Geodatabase como evolución de las bases de datos integradas.

¿Cuándo utilizar el modelo vectorial y cuándo utilizar el raster? La respuesta no es sencilla, ya que involucra criterios distintos, relativos a las fuentes de información, los equipos disponibles o los fines del estudio. Desde un punto de vista conceptual, se puede afirmar que, en general, los elementos naturales del paisaje, que normalmente no poseen bordes marcados sino zonas de transi-

ción, se representan más adecuadamente con el modelo raster. En cambio, los elementos que son resultado de la acción del hombre (divisiones administrativas, límites de propiedad, vías de comunicación) suelen tener bordes nítidos, por lo que se representan mejor con el modelo vectorial.

Ambos modelos presentan una serie de ventajas y desventajas en función de la utilidad que se le quiera dar (Bosque et al., 1999; Gómez y Barredo, 2005), pero es la rapidez y eficiencia en las operaciones de superposición de mapas (álgebra de mapas) la característica determinante para la elección, en la mayoría de los proyectos, del modelo raster, utilizando las funcionalidades vectoriales únicamente para la generación de la cartografía base y la modelización inicial de las variables.

2.1.1.3. La información georreferenciada o Geoinformación.

Como se ha indicado anteriormente, los objetos básicos utilizados para discretizar la realidad son puntos, líneas y polígonos en el caso del modelo vectorial y celdas en el caso del modelo raster. Pues bien, un punto se localiza por un par de coordenadas (latitud y longitud o X e Y), una línea a partir de las coordenadas de los puntos que la definen y un polígono por medio de las coordenadas que definen las líneas que lo cierran. Por su parte, las celdas en una malla regular se localizan mediante su número de fila y de columna. De esta forma, los objetos espaciales con los que se representa el mundo real están georreferenciados, el sistema conoce su localización en el espacio.

El concepto de georreferenciación hace referencia a la asignación, a cada punto de la superficie terrestre, de un par de coordenadas dentro de un sistema de coordenadas homogéneo (Figura 2.47).

La Colección de cartografía Histórica georreferenciada de David Rumsey, es una de las más conocidas y visitadas del mundo, cuenta con alrededor de 18,460 mapas en línea y aunque su especialidad es América del Norte, en su cartoteca podemos encontrar un amplio retrato histórico de todos los continentes (aquí se muestran al-

gunas).

Actualmente la sección dedicada mashups usando el API de Google puede ser visitada en su web (<http://www.davidrumsey.com/view/google-maps>) y contiene, además de la valiosa cartografía, una nutrida información contextual. La resolución de los mapas es excelente y su georreferenciación es notablemente buena tomando en cuenta la distorsión e inexactitudes de estos viejos cartogramas.

Además de la posibilidad de manejar el desplazamiento y el nivel de acercamiento, a la manera de Google Maps, es posible regular la transparencia de la imagen y superponer y comparar distintas capas de información gráfica. (Figuras 2.48 a la 2.50)

En general se basan en una serie de etapas básicas:

1. Se busca una serie de puntos de control (generalmente lugares muy destacados y visibles) y se averiguan las coordenadas de cada uno de ellos en los dos sistemas de coordenadas, (X,Y) y (c,f). En el caso de los mapas escaneados, X e Y aparecen en la imagen con lo que el procedimiento es más simple.
2. Determinación del tipo de transformación más adecuada en función del tipo de datos de partida y del número

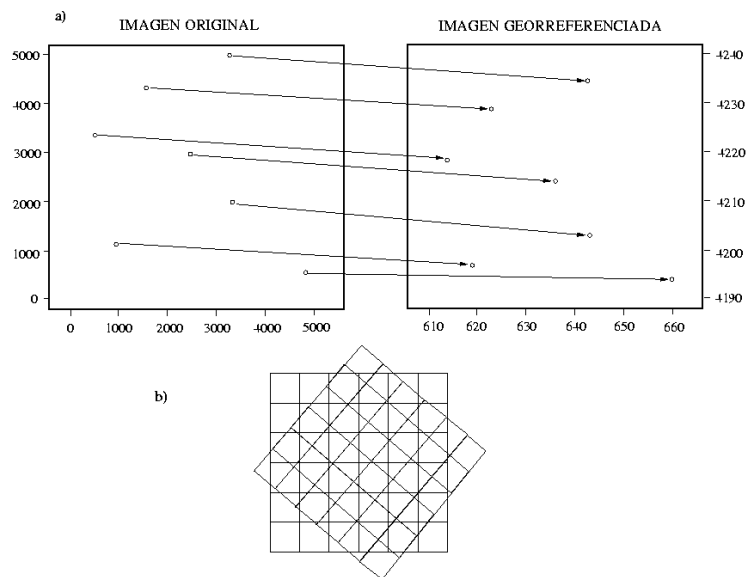


FIGURA 2.47

FIGURA 2.48 a 2.50

David Rumsey Map Collection

CARTOGRAPHY ASSOCIATES

GOOGLE MAPS Share this Page



hybride carte

Launch Google Maps → Launch Maps in LUNA Browser →

Quicklinks

The collection may be viewed with the following applications:

- [LUNA Browser](#)
- [MapRank Search](#) NEW!
- [Google Earth](#)
- [Google Maps](#)
- [Second Life](#)
- [2D GIS](#)
- [3D GIS](#)
- [Insight Java Client](#)
- [Ticker](#)

Reproductions





ro de puntos de control que hayan podido encontrarse.

3. Mediante mínimos cuadrados se obtienen los valores de los coeficientes de regresión a, b, c, d, e y f. Estos coeficientes así calculados permiten realizar una modificación del sistema de coordenadas con el mínimo grado de error.

4. Se aplican las ecuaciones anteriores, con los valores calculados de los coeficientes, a todas las coordenadas iniciales para obtener así sus nuevos valores en el sistema de referencia final.

5. Transferencia la información de los píxeles originales a los píxeles resultantes del proceso de transformación ya que con estas funciones de transformación va a crearse una nueva matriz correctamente posicionada, pero vacía y posiblemente rotada.

El trasvase de valores de la capa original a la transformada puede abordarse por tres métodos dependiendo de la complejidad de la transformación realizada y del tipo de datos:

- Método del vecino más próximo. Sitúa en cada píxel de la imagen corregida el valor del píxel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los valores originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen. Es la más adecuada en caso de variables cualitativas, pero no en teledetección.

- Interpolación bilineal, supone promediar los valores de los cuatro píxeles más cercanos en la capa original. Este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido, de este modo tienen una mayor influencia aquellos píxeles más cercanos en la capa inicial. Reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales pero difumina los contrastes espaciales.

- En la Convolución cúbica, se considera los valores de los 16 píxeles más próximos. El efecto visual es más correcto en caso de que se trabaje con imágenes de satélite o fotografías digitalizadas, sin embargo supone un volumen de cálculo mucho mayor.

2.1.1.4. Los modelos digitales de terreno, base de todo proyecto territorial.

Un modelo es *“una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades”* (Joly, 1988). De esta definición se deduce que la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que queda representado por otro objeto o sistema de menor complejidad. La finalidad del modelo se encuentra también en algunas definiciones como la que da Ríos (1995): *“Un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica”*.

Una clasificación de estos modelos la aporta Turner (1970), distinguiendo, en función de las reglas de construcción del modelo, entre modelos icónicos (a escala como las maquetas), análogos (con propiedades similares y sintéticas como los mapas impresos) y simbólicos (con codificación matemática que permite la aplicación de algoritmos, como las estructuras geométricas). Otra clasificación puede ser la de modelos analógicos y digitales cuya diferencia es la codificación en cifras de estos últimos que permite una representación virtual manejable por medios informáticos.

La forma tradicional de presentar los datos topográficos ha sido en mapas de isolíneas que representan las altitudes del terreno. Con el desarrollo de la informática y con ello de la capacidad de almacenamiento de datos y velocidad de procesamiento, ha surgido la posibilidad de representar los datos topográficos en formato digital, en una malla continua, obteniéndose así un modelo simbólico y digital llamado MDT.

Los Modelos Digitales del Terreno (MDT) han ganado gran popularidad en las últimas décadas, entre todos aquellos especialistas que deban trabajar con datos de la superficie terrestre asociados a coordenadas espaciales. Sin embargo, el origen de este término es más antiguo, se remonta a la década de los años 50 del pasado siglo, momento en que bajo la denominación de Digital Terrain Model, surgió en el Laboratorio de Fotogrametría del Instituto Tecnológico de Massachussets. En esa institución Miller (1958) en un trabajo para acelerar el diseño de carreteras mediante el tratamiento digital de datos del

terreno adquiridos por Fotogrametría, esbozó los principios acerca del uso de esta herramienta en aplicaciones científicas, tecnológicas y militares.

En la literatura especializada, podemos encontrar diferentes definiciones de MDT. Cebrián (1986), expresa que un MDT *es una representación simplificada de una variable que se mide en una superficie ondulada con tres dimensiones*, Bosque (1992), *complementa esta definición diciendo que dos de estas dimensiones se refieren a los ejes de un espacio ortogonal plano (X e Y), la tercera mide la altura (Z) de la variable temática representada en cada punto del espacio.*

Otro autor, Moore, (1991) define un MDT como *un arreglo ordenado de números que representan la distribución espacial de atributos del terreno*, mientras que Felgueiras (1997), expresa que los MDT, *representan la variabilidad de un atributo o fenómeno geográfico, que ocurre dentro de una región geográfica de interés*. Por su parte Felicísimo (1998), considera que un MDT es *“una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua”*.

Todas las definiciones expuestas coinciden de una u otra forma, en que la variable representada en el MDT, debe tener carácter numérico, ser continua y con valores perfectamente vinculados a coordenadas geográficas. No se establece ninguna restricción respecto a la temática de la variable, por lo tanto se puede crear un MDT de cualquier atributo del terreno que cumpla con esas características, esenciales.

En este sentido se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE o DEM) a aquel que representa la variable cota o altura.

El modelo ráster divide el área de estudio en una agrupación de celdas cuadradas, o rejilla, ordenadas en una secuencia específica. Cada una de estas celdas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la celda, por tanto se considera que cubre la totalidad del espacio. Un conjunto de celdas, junto con sus valores se denomina una capa ráster. (Figura 2.52)

En su versión vectorial, tenemos la Red de Triángulos Irregulares TIN (Triangulated Irregular Network), se em-

plea un número finito de puntos para caracterizar toda la superficie en estudio, pero, a diferencia de los Modelos Digitales de Elevación DEM, con una distancia entre puntos variable. Cada trío de puntos contiguos define entre ellos una superficie triangular plana, que tendrá además atributos de pendiente, orientación, etc., lo que hace que estos modelos sean muy adecuados para su uso en aplicaciones hidrológicas. (Figura 2.53)

La no-regularidad en la distancia entre puntos permite prestar especial atención a las zonas muy irregulares, donde se concentraran la mayor parte de los puntos y usar a la vez unos pocos en las zonas del relieve suave. La desventaja del modelo TIN es la mayor complejidad que implica en los algoritmos de manipulación asociados, respecto a los requeridos para el modelo ráster.

Un TIN se compone de una serie de puntos con valores x, y, z conocidos y un conjunto de arcos que los unen para formar triángulos. En general la mayor parte del software de SIG disponible en el mercado utiliza la triangulación de Delaunay que une los puntos más cercanos, confiriéndole a la malla generada las siguientes características:

- Se producen triángulos casi equiláteros, reduciendo así los problemas potenciales de precisión numérica.
- Mejora la calidad de interpolación, al asegurar que cualquier punto sobre la superficie deriva su valor z de los puntos muestreados más cercanos. Independiza el proceso de triangulación del orden en que se introducen los datos.

2.1.1.4.1. Aplicaciones y Modelos derivados

A partir de un Modelo digital de elevaciones (MDE) es posible construir un conjunto de modelos digitales que representan variables derivadas directamente de la topografía (datos y relaciones topológicas entre los mismos), sin intervención de datos auxiliares o información externa.

De las principales variables implicadas en estas aplicaciones, la de uso más general es probablemente la pendiente, aunque también son usadas con frecuencia en geomorfología la orientación y la curvatura (Weibel y Heller, 1991). Franklin y Peddle (1987) mencionan cinco parámetros básicos en este contexto: elevación, pen-

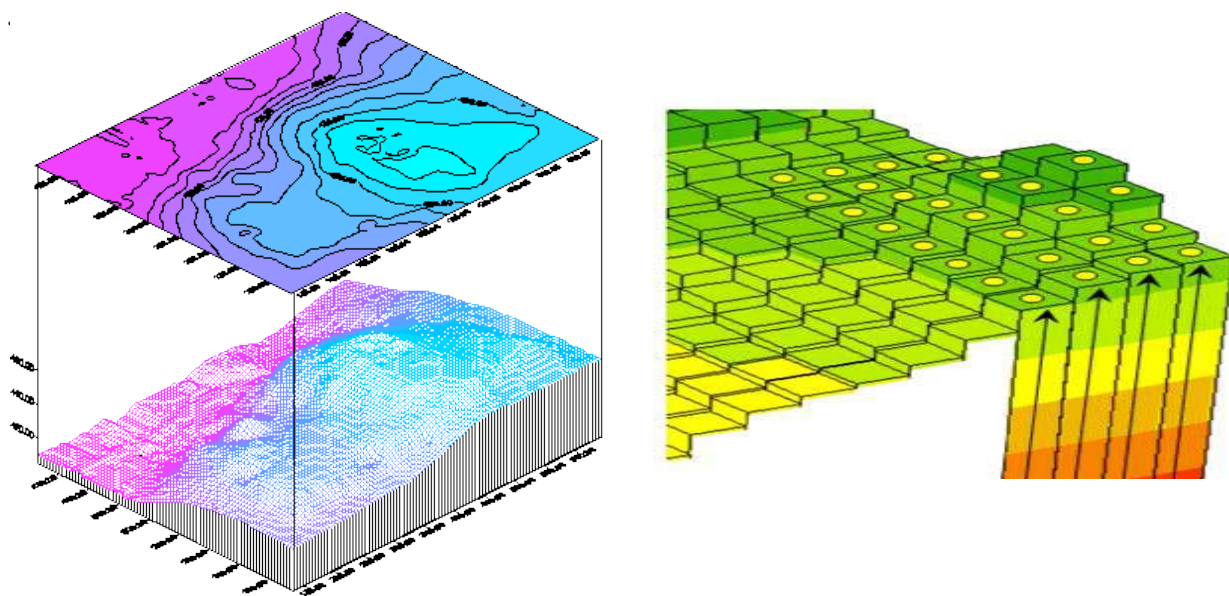
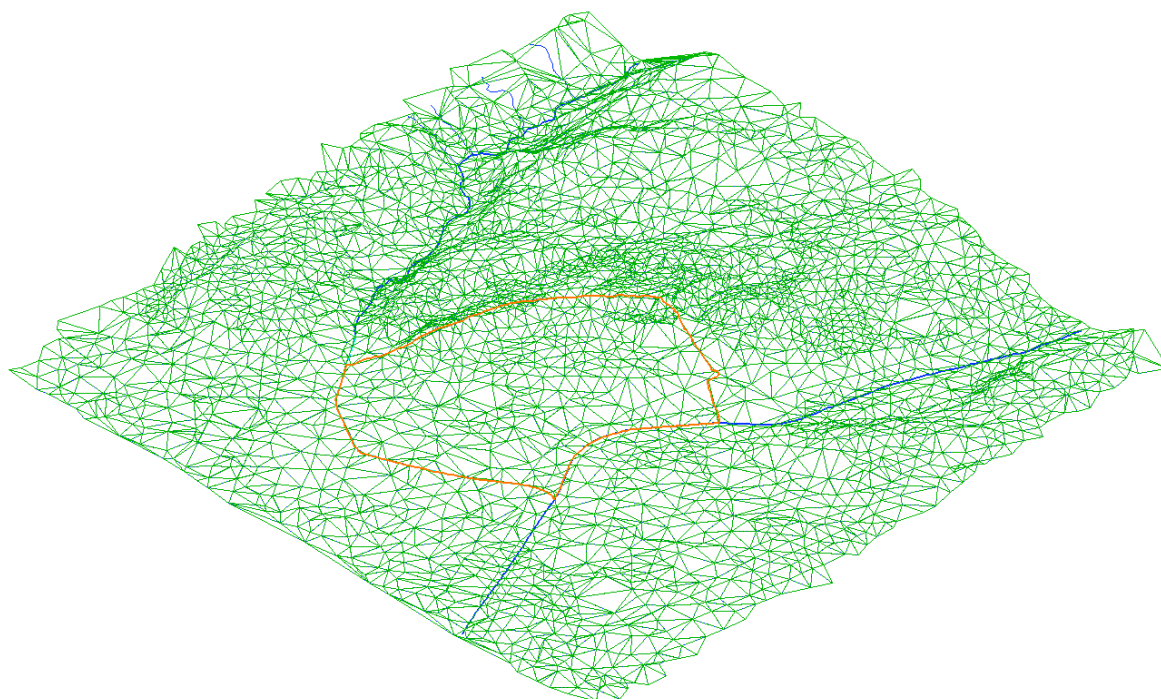


FIGURA 2.52

FIGURA 2.53



diente, orientación, convexidad y relieve o rugosidad. En Mark (1975) puede encontrarse una revisión del estado del tema en los momentos previos al tratamiento informático, donde se analizan las relaciones entre diversos parámetros mediante análisis de correlación.

En lo sucesivo se presentan los métodos utilizados para la construcción de modelos derivados a partir de un MDE raster y algunas de las aplicaciones o utilidades que estas proporcionan. Para ello se comienza, sin embargo, por la definición del gradiente topográfico, un concepto básico de interés para gran parte de los cálculos posteriores.

El gradiente topográfico.

En un modelo digital de elevaciones, la altitud en el entorno inmediato de un punto puede describirse de forma aproximada mediante un plano de ajuste, cuya expresión es:

$$z = a_{00} + a_{10} \cdot x + a_{01} \cdot y$$

Se deduce directamente que los coeficientes a_{10} y a_{01} representan las derivadas primeras de la altitud con respecto a los ejes X e Y:

$$a_{10} = z / x ; a_{01} = z / y$$

Los coeficientes mencionados pueden representarse mediante vectores definidos por los valores de las componentes para el eje X, eje Y y eje Z:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \partial x \\ 0 \\ \partial z \end{bmatrix} ; \mathbf{w} = \begin{bmatrix} 0 \\ \partial y \\ \partial z \end{bmatrix}$$

Dado que el producto vectorial de dos vectores tiene como resultado otro vector perpendicular a ambos, el producto $\mathbf{v} \times \mathbf{w}$ nos define un vector, P, perpendicular al plano que los contiene y, por tanto, a la superficie topográfica a la cual se ajusta. El producto vectorial, eliminando los términos nulos, dividiendo todos los términos por $x \cdot y$ y simplificando, es el siguiente:

$$\mathbf{P} = \mathbf{v} \times \mathbf{w} = \begin{bmatrix} -\partial z \cdot \partial y \\ -\partial x \cdot \partial z \\ -\partial x \cdot \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\partial z / \partial x \\ -\partial z / \partial y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{10} \\ -a_{01} \\ 1 \end{bmatrix}$$

El vector P se denomina gradiente de z en el punto (x,y) (Santaló, 1964). El uso de los valores del gradiente va a mostrarse especialmente útil en el cálculo de los modelos derivados, así como en la ejecución de otras modelizaciones más complejas. En las aplicaciones sobre MDE raster, las estimaciones de los coeficientes del gradiente se realizan mediante operadores que se aplican sobre un entorno definido del punto problema (habitualmente los 4 vecinos más próximos). Para un punto situado en la fila i, columna j, donde d es la distancia entre filas y columnas, los valores se calculan a partir de los cambios de altitud entre puntos vecinos. La opción más simple utiliza las expresiones siguientes:

$$a_{10} = z_{i,j+1} - z_{i,j-1} / 2d ; a_{01} = z_{i-1,j} - z_{i+1,j} / 2d$$

Sobre el cálculo empírico del gradiente en los MDE, Jones et al. (1988) llaman la atención sobre la relación existente entre los valores del gradiente y la precisión de los datos de altitud. Es posible, en efecto, que si el MDE ha sido construido a partir de un modelo vectorial poco resolutivo (con curvas de nivel excesivamente espaciadas y pocos datos de apoyo en zonas conflictivas), las operaciones posteriores de interpolación produzcan una distribución de valores de a_{10} y a_{01} con claras discontinuidades. La discretización de las distribuciones del gradiente se manifiesta en la práctica mediante una apariencia aterrazada muy llamativa de los modelos derivados (ver, por ejemplo, Jones et al., 1988; Chuvieco y Congalton, 1989; Hinse et al., 1988). Para reducir el error derivado de la posible discretización de las distribuciones del gradiente, Jones et al. (1988) recomiendan el uso de los 8 datos más próximos al punto problema: El cálculo de los coeficientes se realiza en este caso mediante operadores de dimensión [3x3], denominados operadores de Prewit y de Sobel (James, 1988). El operador de Prewit coincide con el método propuesto por Sharpnack y Akin (1988) y utilizado en el sistema de información geográfica Erdas (Erdas, 1991). El operador de Sobel es el utilizado en ArcView y refuerza el peso de los datos más próximos al punto problema:

$$a_{10} = (z_{i-1,j+1} + z_{i,j+1} + z_{i+1,j+1}) - (z_{i-1,j-1} + z_{i,j-1} + z_{i+1,j-1}) / 6d$$

$$a_{01} = (z_{i-1,j-1} + z_{i-1,j} + z_{i-1,j+1}) - (z_{i+1,j-1} + 2z_{i+1,j} + z_{i+1,j+1}) / 8d$$

Los modelos raster tienen una estructura especialmente adecuada para manejar estas formas de expresión y los

cálculos se llevan a cabo mediante operaciones locales poco complejas. Sin embargo, en los bordes del modelo se necesitan tratamientos especiales (Dozier y Strahler, 1983:963). Si se trata de la primera fila o columna de un MDE se utilizan las siguientes expresiones:

$$\left. \begin{aligned} a_{10|i-1} &= \frac{-3 \cdot z_{i,1} + 4 \cdot z_{i,2} - z_{i,3}}{2 \cdot d} \\ a_{01|i-1} &= \frac{-3 \cdot z_{1,j} + 4 \cdot z_{2,j} - z_{3,j}}{2 \cdot d} \end{aligned} \right\}$$

Si se trata de la última fila o columna de un total de n:

$$\left. \begin{aligned} a_{10|i=n} &= \frac{z_{i,n-2} - 4 \cdot z_{i,n-1} + 3 \cdot z_{i,n}}{2 \cdot d} \\ a_{01|i=n} &= \frac{z_{n-2,j} - 4 \cdot z_{n-1,j} + 3 \cdot z_{n,j}}{2 \cdot d} \end{aligned} \right\}$$

Pendiente. Obtención de planos clinométricos.

La pendiente en un punto del terreno se define como el ángulo existente entre el vector normal (vector gradiente P) a la superficie en ese punto y la vertical (eje z). Su

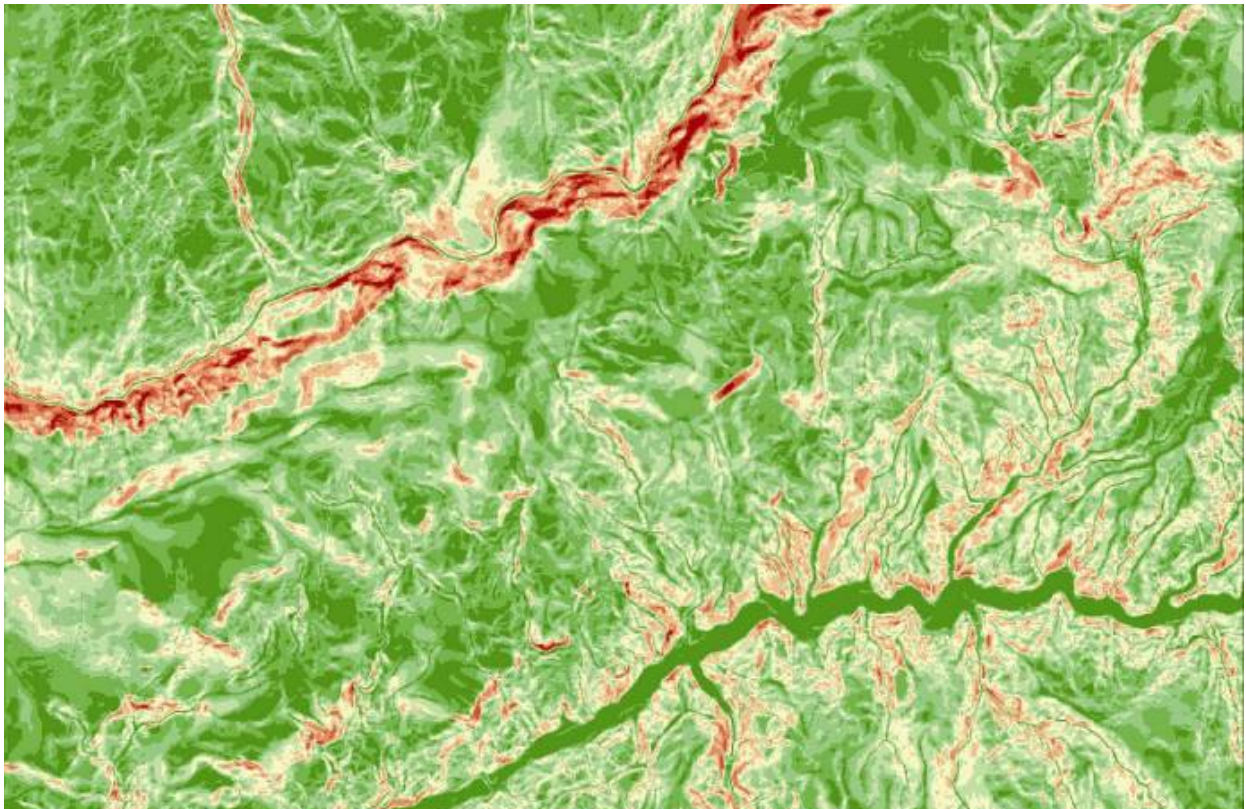
estimación es sencilla a partir del MDE y se basa en el cálculo de la pendiente (conocida la diferencia de cota y la distancia en horizontal) de los ocho vecinos, en el caso de la aproximación raster. La pendiente en cada celda tomará el valor máximo de ellas (figura 2.54).

Es demostrable (Felicísimo, 1994 y Wood, 1996) que la pendiente puede calcularse a partir de las componentes del gradiente mediante la expresión:

$$\gamma = \tan^{-1} \sqrt{a_{10}^2 + a_{01}^2}$$

Dada la expresión del gradiente, el valor de γ refleja la pendiente media en el entorno utilizado para calcular los componentes a_{10} y a_{01} . La expresión anterior es la más utilizada en la práctica en el tratamiento de los modelos raster (Papo y Gelbman, 1984, Franklin, 1987 y Erdas, 1991) pero para el cálculo de la pendiente existe un buen número de alternativas cuyas ventajas y problemas deben evaluarse en cada caso y para cada aplicación.

FIGURA 2.54



Los métodos más habituales se clasifican en función del número de puntos que intervienen en el cálculo (2, 3, 4 u 8 puntos). Así Horn (1981) usa 8 puntos con el operador de Sobel, que pondera más los 4 vecinos más próximos que los situados en las diagonales. Es el método usado en ArcView y tiene la ventaja de que son menos sensibles al error en el MDE ya que, al intervenir un número elevado de puntos, las posibles desviaciones individuales pierden peso y pueden compensarse parcialmente entre ellas.

Para los modelos TIN basta con asociarle la pendiente que tiene el triángulo al que pertenece ese punto. La gran mayoría de los SIG permiten su cálculo inmediato a partir del MDT tanto en grados como en tanto por ciento.

Orientación.

La orientación, definida como el ángulo existente entre el vector que señala el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto, es calculada con igual facilidad.

Como en el caso de la pendiente, el valor de la orientación se estima directamente a partir de los valores del gradiente:

$$\phi = \tan^{-1}(a_{10}/a_{01})$$

El algoritmo es algo más complejo que en el caso de las pendientes ya que deben contemplarse algunos casos especiales (terreno llano, por ejemplo), así como rectificar los valores devueltos por el lenguaje de programación (valores negativos del ángulo para valores negativos del argumento de la función arco tangente). El resultado es un mapa cuyos valores son clasificados según las ocho orientaciones (figura 2.56).

Curvatura.

La curvatura, también llamada convexidad local o tasa de cambio de la pendiente, tiene especial interés como variable influyente en fenómenos como la escorrentía superficial, erosión y flujos en general. (figura 2.57)

La curvatura en un punto, κ , depende, por tanto, de las derivadas de segundo grado de la altitud (es decir, de los cambios de pendiente en el entorno del punto).

El análisis de curvatura puede tener interés en forma direccional como, por ejemplo, realizando un seguimiento

a lo largo de un perfil hidrológico y perpendicularmente a la línea de flujo. En este caso, la formulación de la curvatura depende del valor de orientación en el punto problema.

Rugosidad.

La rugosidad del terreno mide lo variado que es el relieve en un punto y en su entorno inmediato (vecindad). De este modo es posible determinar lo difícil o complicado que resulta salir de ese punto en cualquier dirección. Para ello, se parte del mapa de alturas, pendientes u orientaciones y se establece la variedad de tipos de píxeles o la varianza de alturas en su entorno. Cuanto mayor sea este valor, mayor rugosidad del relieve.

Al contrario de lo que ocurre con la pendiente y la orientación, no existen criterios uniformes para llevar a cabo la medida de la rugosidad.

Diversos autores han aplicado métodos significativamente distintos para su evaluación; por ejemplo, Balce (1987) utiliza la pendiente media como estimador de un factor de rugosidad. Evans (1972) realiza una revisión de métodos, entre los cuales menciona desde rangos de altitud hasta la desviación estándar de la elevación en entornos limitados. Hobson (1972), tras destacar la dificultad de dar una definición precisa de la rugosidad, usa tres métodos para su evaluación. El primero es una comparación entre la superficie "real" (medida en el campo) y la proyectada sobre la horizontal; en el segundo se usan estadísticos para medir las diferencias entre las cotas reales y superficies de ajuste; en el tercero, finalmente, usa los vectores normales a la superficie para analizar su dispersión y la suma vectorial. Otro índice que puede ser utilizado para el cálculo de la rugosidad es la varianza de la pendiente, derivado de los índices de textura habitualmente utilizados en el análisis de imágenes.

Isolíneas.

A partir de una superficie continua como es el MDE es directa la generación de isolíneas o curvas de nivel con la equidistancia deseada o el lugar geográfico de todos los puntos que se encuentran a una determinada cota. Esta funcionalidad es muy útil para la representación del terreno mediante planos hipsométricos.

En el diseño de carreteras es común el uso de software

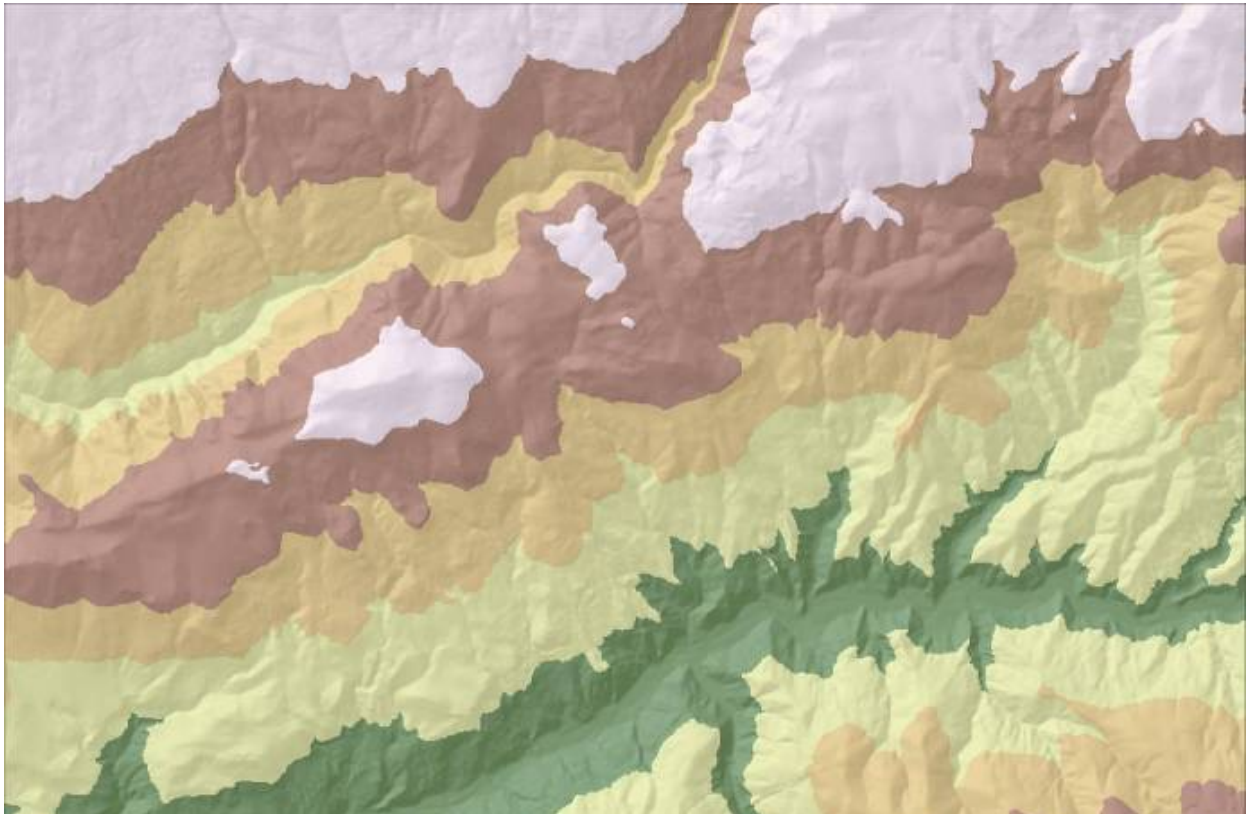
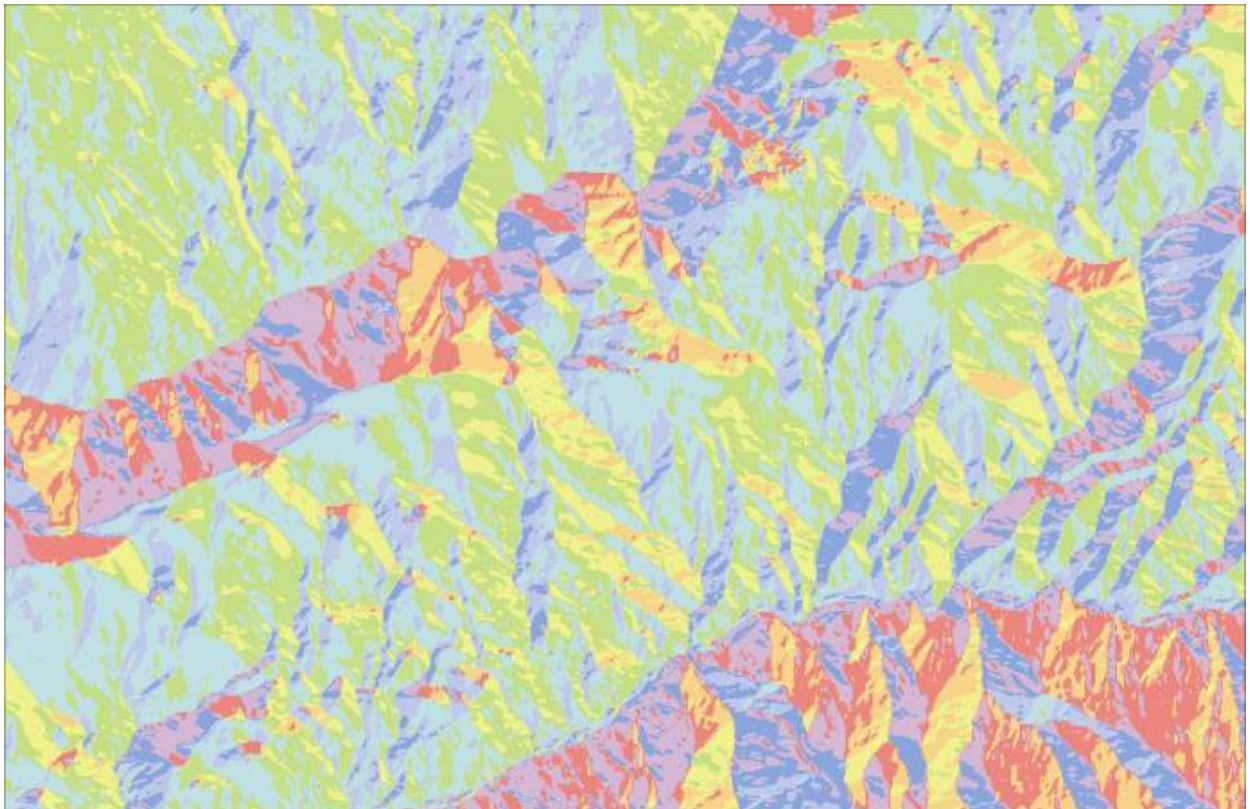


FIGURA 2.55

FIGURA 2.56



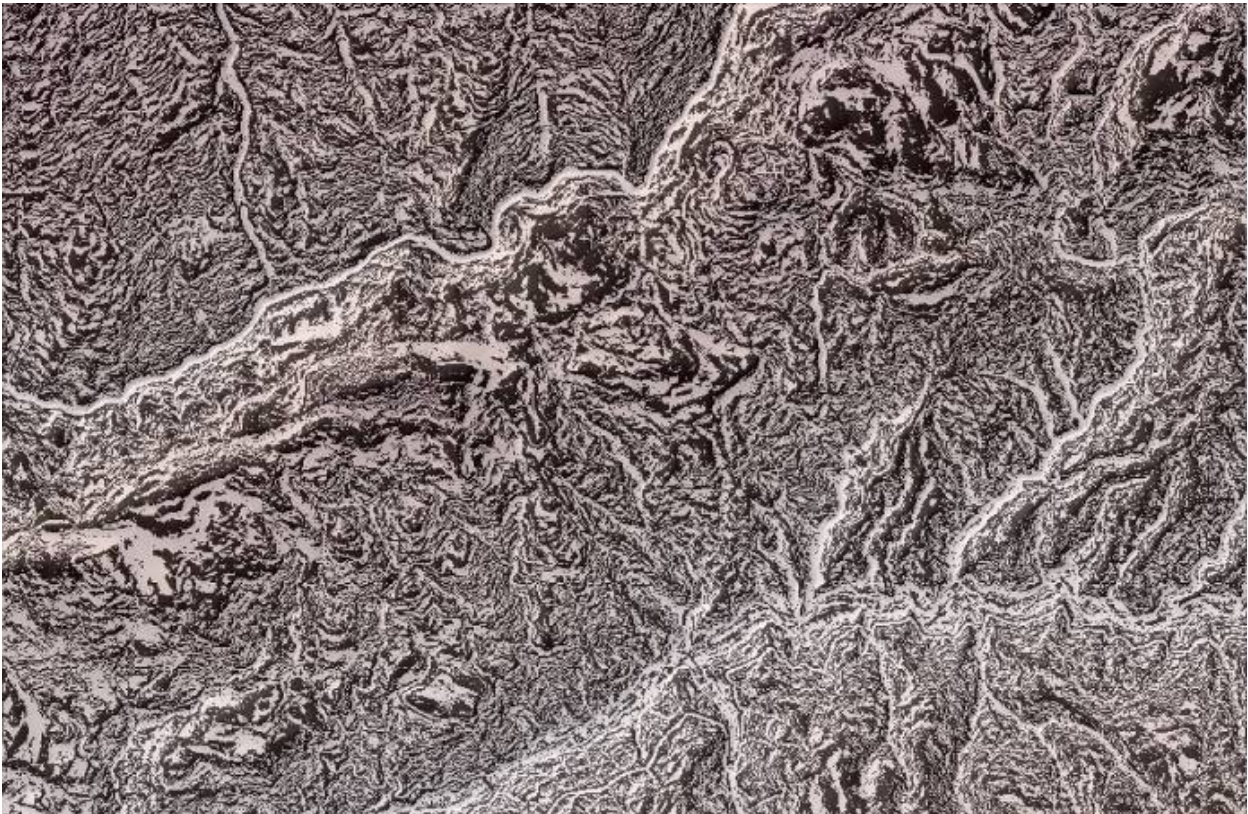
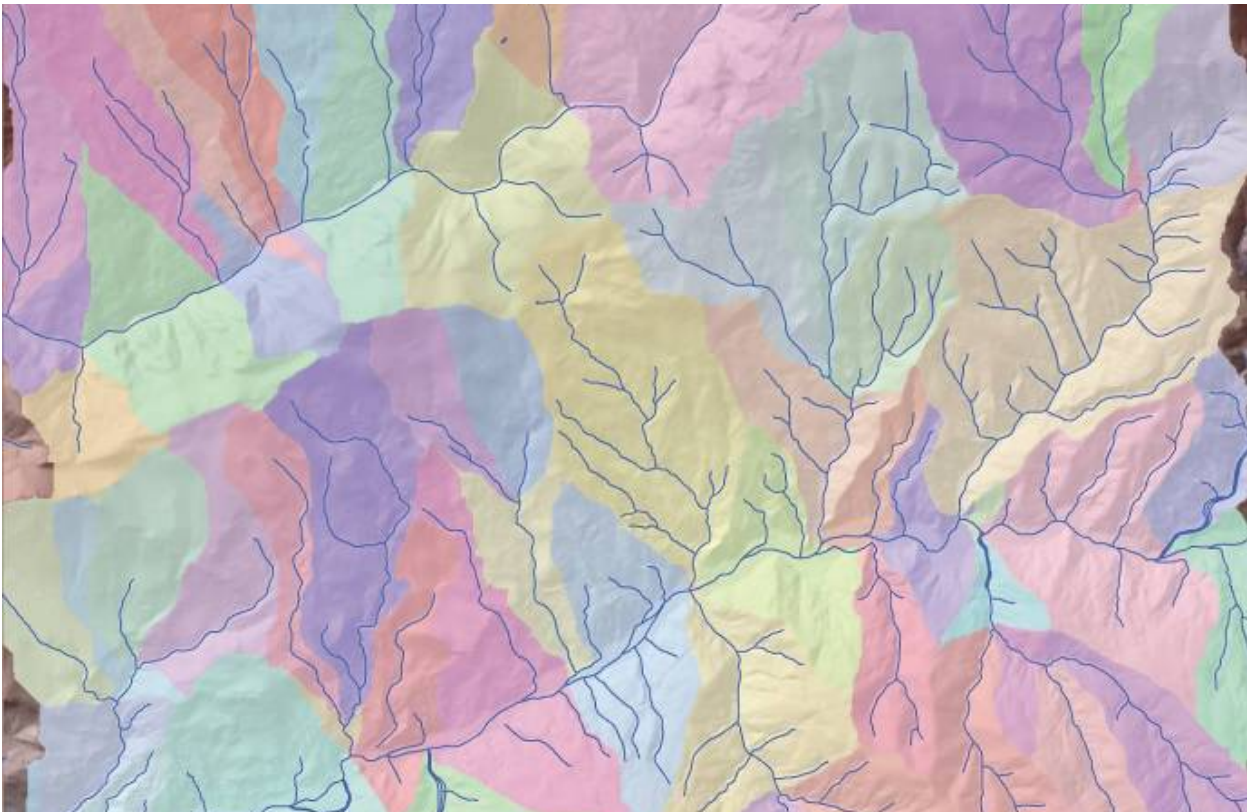


FIGURA 2.57
FIGURA 2.58



como el Clip o el Istram Ispol que precisan de curvas de nivel con equidistancia reducida para la modelización de su componente vertical.

La ausencia de cartografía de detalle fuera de los ámbitos estrictamente urbanos puede resolverse con la utilización de un Mdt preciso (Mdt10, PNOA5 o LIDAR).

Perfiles topográficos.

La realización de perfiles topográficos es una aplicación del cálculo de valores puntuales de altitud, presentado en el apartado anterior. El problema se descompone habitualmente en los siguientes pasos:

1. Se definen los puntos inicial y final del segmento rectilíneo sobre el que se levantará el perfil topográfico.
2. Se fija el número de puntos del perfil (su resolución en el plano XY).
3. Se calculan las coordenadas (x,y) de cada punto del perfil.
4. Se estima por interpolación la altitud z de cada punto (x,y)

El cálculo de volúmenes bajo una superficie se basa en situar debajo de cada píxel del Mdt un prisma rectangular, cuyo volumen geométrico se obtiene fácilmente, de modo que es posible calcular el volumen de esta porción elemental bajo cada píxel. Sumando todos estos pequeños volúmenes se obtiene el volumen total bajo la superficie. (Bosque 1992)

Esta operación se puede ampliar al cálculo del volumen entre dos superficies onduladas, una, por ejemplo, la del Mdt real y la otra la que existiría en caso de llevar a cabo una obra como la construcción de una carretera; de este modo, es posible conocer el volumen de tierras que es preciso mover (tanto para vaciar porciones del terreno o desmonte, como para rellenar otras o terraplén) en la realización de las diferentes alternativas de construcción existentes.

Análisis de intervisibilidad y cuencas visuales. Exposición visual.

El cálculo de la intervisibilidad entre dos puntos es una aplicación que utiliza el método de levantamiento de perfiles como base para una etapa posterior de análisis.

Esencialmente, la solución al problema de si dos puntos están conectados por una línea visual consiste en la construcción del perfil topográfico que los une y el análisis posterior de los puntos intermedios para comprobar si su altitud intercepta la línea visual. El proceso sigue los pasos siguientes:

1. Se fijan los puntos a analizar P(i), P(j).
2. Se realiza el perfil topográfico entre ambos, que consta de n puntos.
3. Se toma un punto P(k) del perfil (comenzando por el más próximo a P(i)) y se comprueba si intercepta la línea visual entre P(i) y P(j). Pueden ocurrir tres casos:
 - 3.1 P(k) intercepta la línea visual: no existe intervisibilidad; fin del análisis.
 - 3.2 P(k) no intercepta la línea visual y $k=n-1$ (es el inmediato anterior a P(j)): existe intervisibilidad entre P(i) y P(j); fin del análisis.
 - 3.3 P(k) no intercepta la línea visual y $k < n-1$ (no es el inmediato anterior a P(j)): se toma el punto siguiente, P(k+1) y se repite el análisis desde el punto 1.

El análisis de ocultamiento de la línea visual por un punto depende de la altitud de dicho punto Z(k) y de la correspondiente a la línea visual en el mismo lugar. Si Z(k) es mayor, el punto intercepta la línea visual (figura 2.59). El análisis puede realizarse de varias formas, entre las que se propone la siguiente:

1. Se calcula la pendiente de la línea visual (ángulo con respecto a la horizontal) desde el punto inicial al final: $\tan v$ (el uso de la tangente es ventajoso para el cálculo, ya que se deduce de los datos sin necesidad de efectuar operaciones trigonométricas).
2. Se calcula la pendiente equivalente entre el punto inicial y el punto problema (que forma parte del perfil): $\tan p$.
3. Se comparan las pendientes: si $\tan v > \tan p$ no existe intercepción, en caso contrario, el punto problema intercepta la línea visual y no existe intervisibilidad.

Identificación de cuencas visuales.

A partir de un mapa de elevaciones del terreno es posible determinar qué celdas son visibles y no visibles desde una determinada celda. La generalización del análisis de intervisibilidad entre dos puntos permite la construcción de cuencas visuales (Figura 2.59). La cuenca vi-

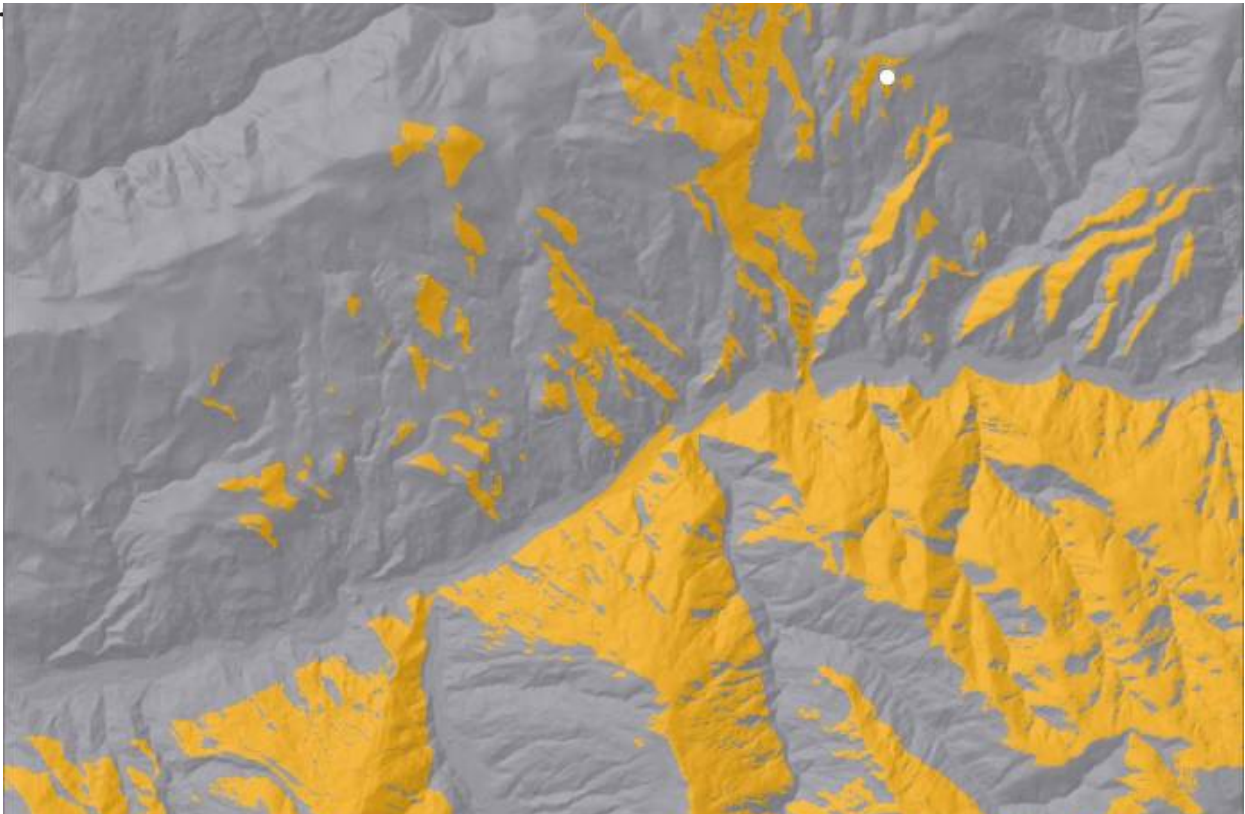
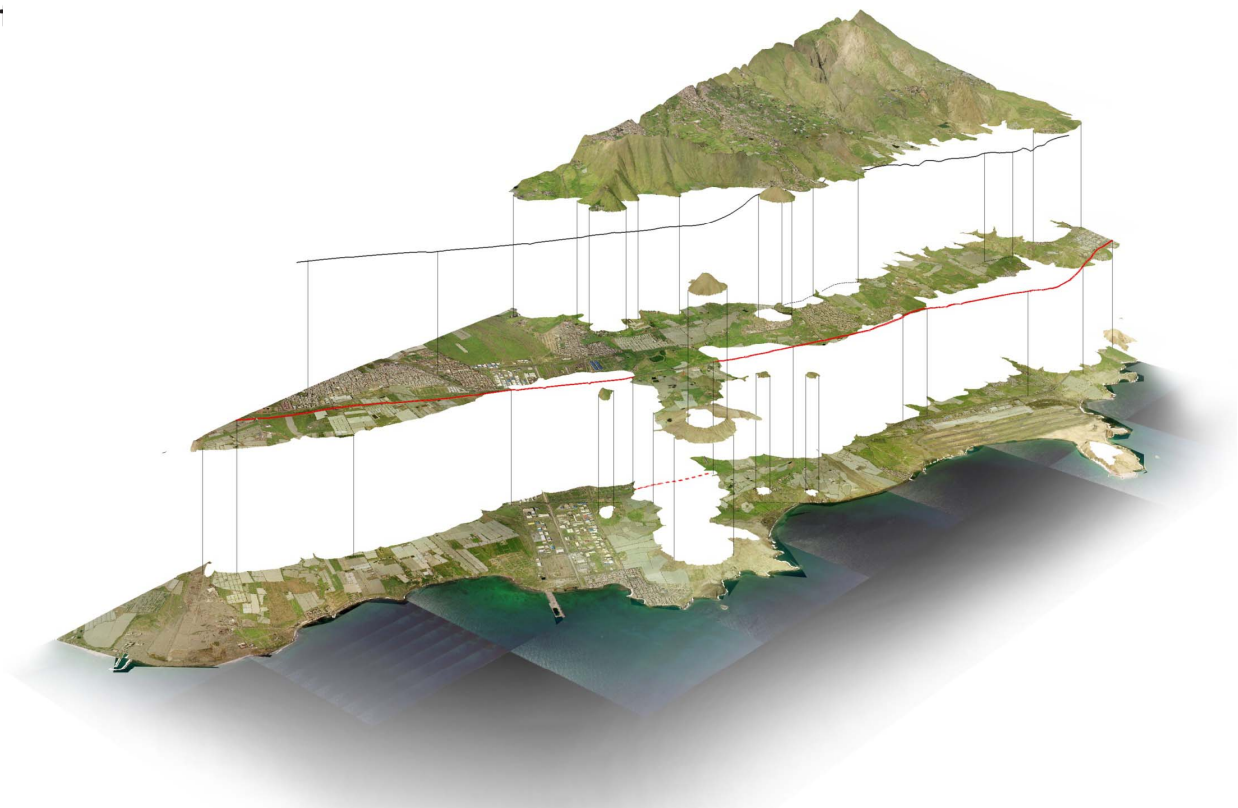


FIGURA 2.59.
FIGURAS 2.60 y 2.61.



sual de un punto base o foco se define como el conjunto de puntos de un modelo con los cuales este punto base está conectado visualmente. La construcción de cuencas visuales tiene gran interés en los estudios de impacto visual, ya que constituye un paso imprescindible para evaluar la influencia de una acción sobre su entorno desde el punto de vista paisajístico. La construcción de la cuenca visual de un punto es una labor de cálculo intensivo ya que implica la realización de numerosos análisis de intervisibilidad entre dos puntos.

El método más simple para la construcción de la cuenca visual de un punto es la realización del análisis para cada punto del modelo, para ello el sistema traza líneas de visión en todas direcciones, de forma que se puede determinar si dos celdas son visibles entre sí: se toma como punto inicial, $P(i)$, el foco o punto problema y se barre el modelo tomando tantos $P(j)$ como puntos tenga éste. En este caso se consigue la máxima precisión ya que existe un análisis específico para cada punto, pero el tiempo de ejecución puede ser muy elevado (en función del número de puntos del modelo y de la visibilidad

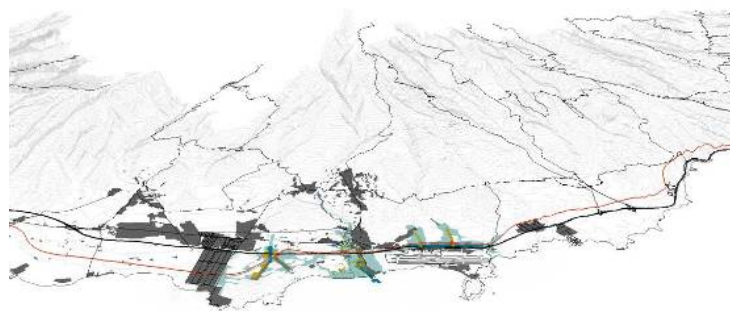
del foco), y gran parte de los análisis son redundantes.

La conveniencia de reducir la complejidad de las operaciones recomienda acotar el problema mediante limitaciones bien en el área, bien en la precisión de la búsqueda. El área puede reducirse mediante la definición de un radio de búsqueda de dimensiones limitadas. Otra aproximación diferente es aquella en la que los perfiles se trazan radialmente a intervalos angulares predefinidos. Si se desea una búsqueda rápida, debe fijarse un intervalo angular moderadamente grande y un radio de búsqueda pequeño: por ejemplo, un incremento de 1° genera 360 perfiles radiales al foco, dentro de los cuales sólo se calculará la intervisibilidad para los puntos cuya distancia al centro sea menor o igual al radio de búsqueda.

El resultado es un mapa en el que se diferencian las zonas visibles de las que no lo son mediante un determinado código (0 o 1), de forma que se delimitan las cuencas visuales de forma automática.



Concurso Internacional de Proyectos
Flowpolis. "La forma del espacio nodal"
Gran Canaria 2006



El análisis de cuencas visuales puede utilizarse para la evaluación del impacto visual de actuaciones con efectos negativos sobre el paisaje. En este sentido, puede ser útil la creación de modelos de visibilidad, donde cada punto tiene asignado un valor proporcional a la extensión de su cuenca visual. Un modelo de este tipo puede servir de base objetiva para la toma de decisiones ya que permite conocer y comparar con fiabilidad la incidencia visual de las alternativas existentes.

Un paso más allá en lo que se refiere a la conectividad visual sería la “exposición visual” referente al mismo concepto sólo que sumando el número de veces que cada celda es vista por el total de las celdas de observación.

Visualización del relieve, sombreados y modelos de insolación.

A pesar de las posibilidades de tratamiento numérico que permiten los MDE, siempre es deseable poder ofrecer directamente una buena representación sintética del relieve para permitir una interpretación visual.

Este aspecto ha sido destacado, entre otros, por Buttenfield y Mackaness (1991), indicando que *“la visualización es un importante componente de cualquier esfuerzo para comprender, analizar o explicar la distribución de fenómenos en la superficie de la tierra, y toma importancia creciente según los volúmenes de datos se hacen menos manejables”*.

La representación del relieve plantea algunos problemas prácticos para permitir una interpretación directa y sencilla de los elementos topográficos. El relieve en los modelos digitales se expresa en términos de elevación sobre un nivel de referencia, por lo que su traspaso a una superficie bidimensional, como un papel o una pantalla gráfica, no puede realizarse de forma completa y es necesario acudir a simplificaciones de diversos tipos.

En principio, los valores de altitud pueden codificarse directamente en una escala de grises, donde el menor valor correspondería al negro y el mayor al blanco. La apariencia visual de este tipo de representaciones es interpretable, pero hace difícil la localización precisa de los elementos del relieve. Un caso similar lo plantea la presentación de los valores de pendiente que, en los mapas convencionales, suele hacerse más con criterios

visuales para facilitar la interpretación que intentando representar fielmente los valores reales.

Esto es debido a que la interpretación de la representación topográfica se realiza inevitablemente con hábitos estrechamente relacionados con los patrones de iluminación cotidianos, que si no se tienen en cuenta en estos casos harán difícil la interpretación. Debido a esta dependencia psicológica es deseable desarrollar métodos que permitan una simulación de la apariencia real de una superficie cuando es iluminada por una fuente de luz. Si ésta es direccional y dirigida oblicuamente desde una dirección adecuada, y el modelo tiene una resolución aceptable, la apariencia de la superficie puede ser suficientemente convincente.

El problema del sombreado del relieve es equivalente al planteado para la identificación de cuencas visuales. La diferencia reside, en este caso, en que la situación del foco (sol) está muy alejada y se define en términos de azimut y altura sobre el horizonte.

Definiremos la insolación potencial en un punto como el tiempo que ese lugar está sometido a la radiación solar directa en ausencia de nubosidad. En un ámbito geográfico limitado (con condiciones climáticas similares), puede aceptarse que las diferencias de insolación entre dos puntos en un mismo día del año están exclusivamente condicionadas por el relieve por lo que su análisis puede abordarse a partir del modelo digital de elevaciones.

Puntos críticos del relieve, delimitación de cuencas de drenaje y líneas de flujo.

Un intento de describir las formas geométricas de la topografía, es la determinación de los llamados puntos y líneas críticas del terreno: las cimas, pozos y pasos, así como las líneas de cumbres, las de cauces y las de media ladera. Con este objetivo se han desarrollado numerosos algoritmos, siendo uno de los más conocidos el de Peucker y Douglas. El procedimiento es muy simple, basta con obtener, mediante operaciones de vecindad inmediata, las diferencias de alturas entre cada píxel y sus ocho vecinos, si todas son positivas habrá un pozo y si todas son negativas una cima.

A partir del Mdt se pueden generar modelos de dirección

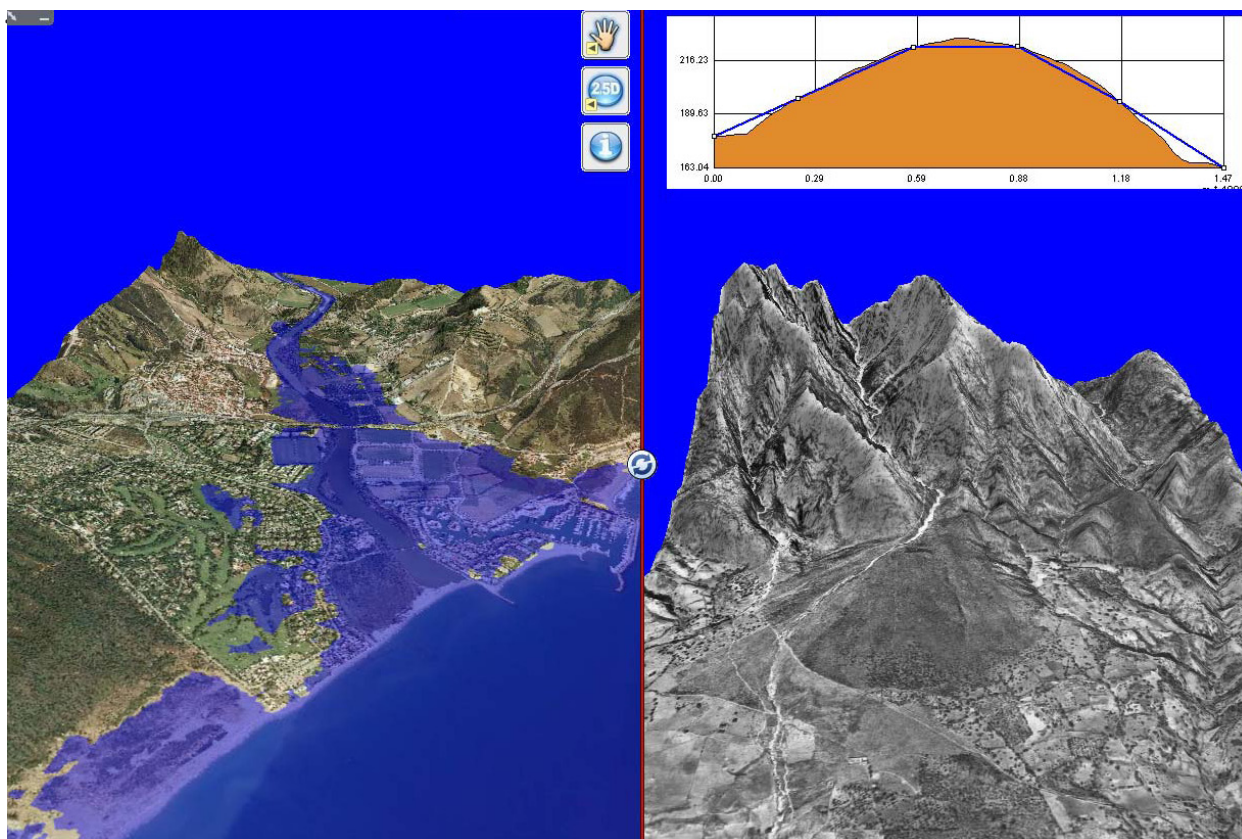
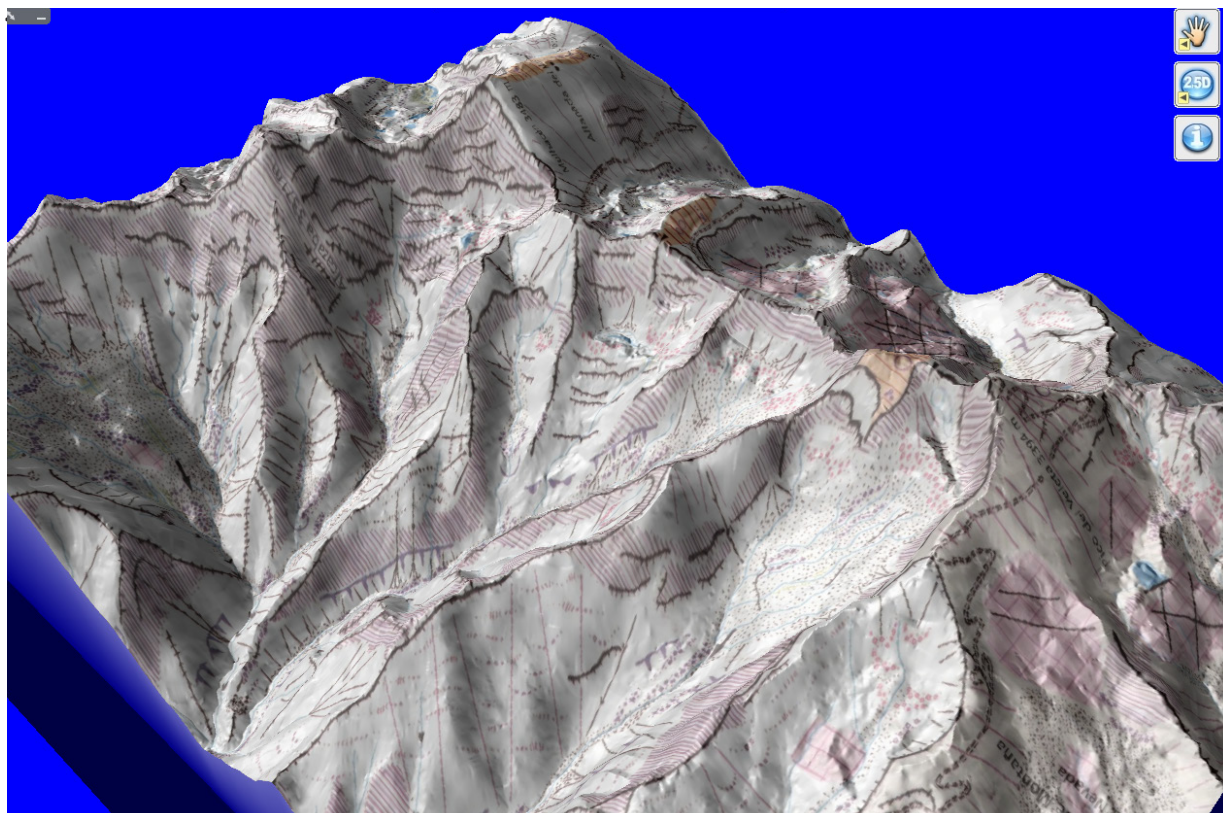


FIGURA 2.62

FIGURA 2.63



y acumulación de flujo que discriminan de forma natural cuencas de drenaje y líneas de flujo. (Figura 2.58)

La delimitación de las cuencas de drenaje establece el conjunto de puntos de un mapa que vierten, a un río, lago o serie de píxeles de referencia. El cálculo se realiza analizando el mapa de orientaciones. Si indicamos la orientación de cada píxel con un vector dirigido hacia donde vierte las precipitaciones que recibe directamente o recoge de otros píxeles, resulta fácil establecer qué zonas están relacionadas por este concepto, y con ello se pueden delimitar las cuencas de drenaje existentes en un Mdt. (Figura 2.64)

2.1.1.4.2. Modelos de elevaciones comerciales y sistemas LIDAR

Un modelo digital de elevaciones es para un ingeniero, la base o armazón de todas las variables del medio físico que pueden entrar a formar parte de un proyecto y debe ser un banco de pruebas donde sintetizar todos aquellos elementos que tienen una incidencia representativa en el medio (Morillo, 2002). (Figura 2.60 y 2.61)

Entre los MDE que se pueden encontrar destacan a escala mundial el procedente de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) realizada por la Nasa, NIMA y Agencia Espacial Alemana e Italiana. (<http://srtm.usgs.gov/>) distribuido por el USGS EROS Data Center. Los datos públicos tienen las siguientes especificaciones:

- Los datos públicos tienen una resolución de 3 segundos de arco \approx 90 metros
- La precisión altitudinal es de \pm 16 metros al 90% de probabilidad (\pm 19 metros al 95% suponiendo normalidad) y la planimétrica de \pm 60 metros al 90% de probabilidad (\pm 68 metros suponiendo binormalidad), lo que supone que estos mapas son aceptables a la escala 1/350.000 bajo las recomendaciones cartográficas generales (a escala 1/350.000, precisión planimétrica al 95% de 70 metros y altitudinal en las curvas de nivel, de \pm 33 metros al 95%)
- Las altitudes están referidas al geoide EGM96, es decir, sobre el nivel del mar.
- Los MDEs proyectados tienen una resolución de 100 metros y las transformaciones de datum y proyección

se realizaron usando el algoritmo de interpolación cubic convolution.

- El datum WGS84 y el datum ETRS89 se han considerado idénticos ya que sus diferencias son sólo apreciables cuando se necesita una precisión submétrica.

- Los datos no están procesados por lo que las líneas de costa no están claramente definidas, existen picos y simas no reales debidas al ruido del sensor, existen pequeñas zonas sin datos por sombras y por pérdida de la señal en lagos y embalses. Los datos en aguas someras son muy ruidosos por la dispersión producida por el agua. Todos estos inconvenientes se están solucionando por distintas agencias y organismos.

- Los DEMs se encuentran en formato Grid de Arc/Info-ArcView-ArcGis y comprimidos en formato RAR.

Estos modelos para el ámbito español estaban accesibles hasta hace muy poco desde el enlace (<http://topografía.montes.upm.es/>)

A escala nacional destaca el desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el CNIG para el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con una resolución planimétrica de 5 metros.

A escala regional, en la Comunidad Autónoma Andaluza se dispone del “Modelo Digital del Terreno de Andalucía. Relieve y Orografía”. Obtenido como producto intermedio para la generación de la ortofotografía de Andalucía (0,5x0,5), con una resolución planimétrica de 10 metros, georeferenciado según la proyección UTM en huso 30 y sistema de referencia ED50, es el Mde comercial de más resolución y exactitud altimétrica de la región que desplaza a los anteriores del MDE 100 y MDE 20. Este modelo, comercializado en 2005, surge de un convenio de colaboración entre las Consejerías de Obras Públicas y Transportes, Agricultura y Pesca y Medio Ambiente para establecerse como la base altimétrica oficial de la Junta de Andalucía.

El LIDAR (Light Detection and Ranging) es un sistema láser activo, montado generalmente sobre una avión, capaz de emitir pulsos de luz láser en la banda del espectro electromagnético comprendido entre el infrarrojo y el ultravioleta (500 - 1500 nm), para posteriormente

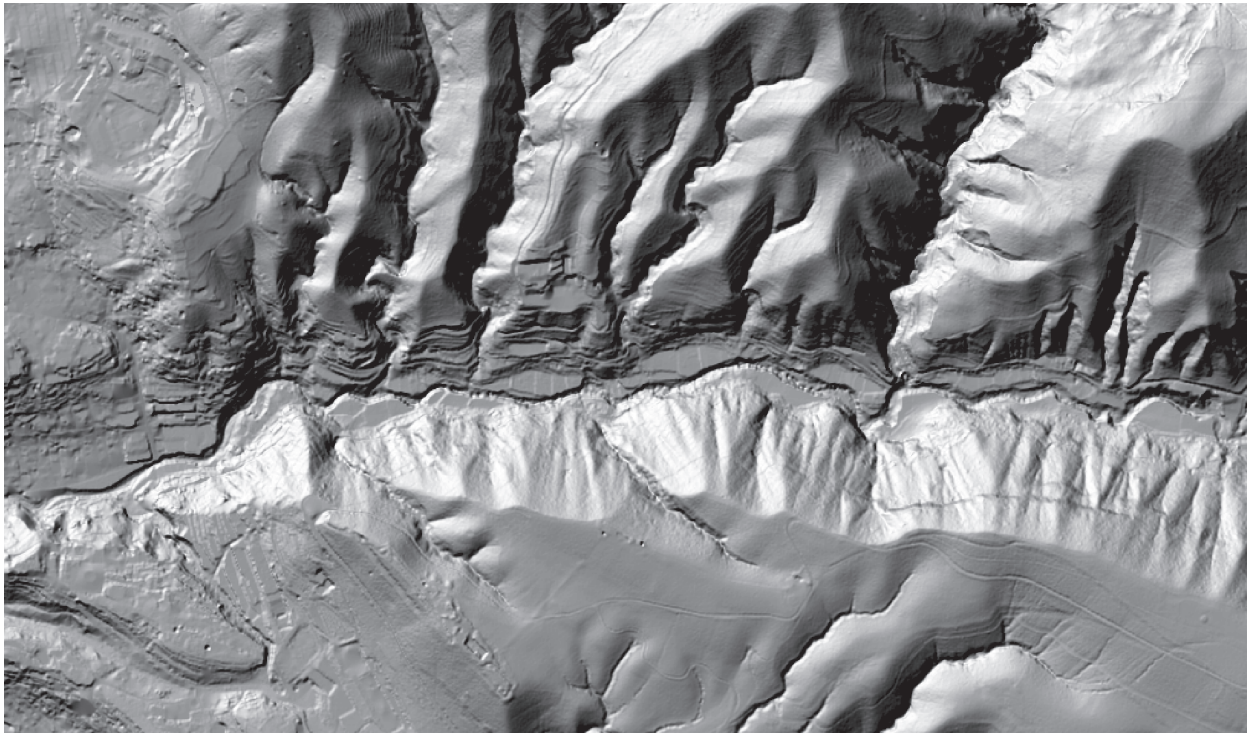
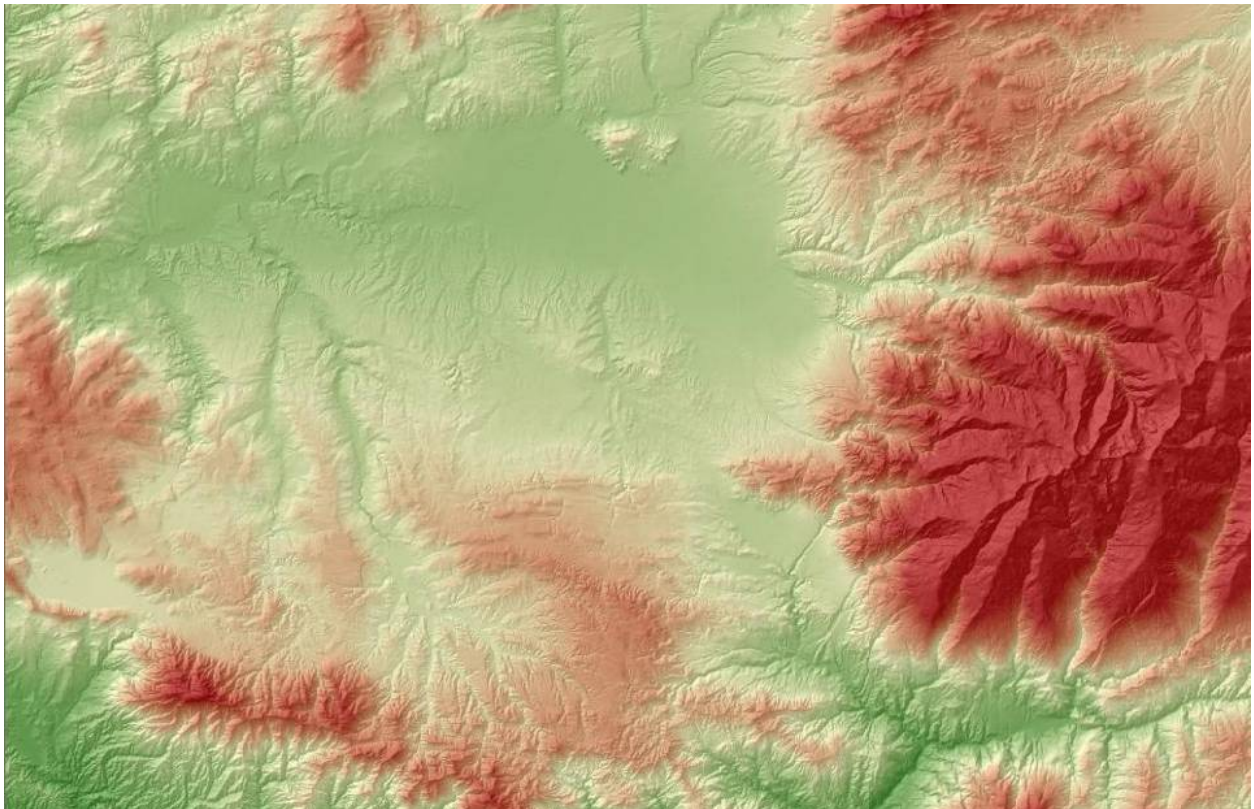


FIGURA 2.64
FIGURA 2.65



capturar la señal reflejada por la superficie barrida. Midiendo el tiempo empleado por cada una de las señales emitidas (pulsos) en recorrer el espacio que separa al transmisor de la superficie del terreno. El retraso medido indica la distancia entre el sensor y la superficie terrestre. Un receptor GPS que proporciona la posición y la altura del avión en cada momento, y un sistema inercial que informa de los giros del avión y de su trayectoria. Se obtiene así de forma casi instantánea una nube muy densa (en torno a un punto cada 40 cm y entre 5000 y 100.000 puntos por segundo) de puntos sobre el terreno cuyas coordenadas (x,y,z) quedan registradas con gran precisión (Baltsavias, 1999; Hodgson et al., 2005). Los errores de medición están en torno a 15 cm en la vertical y 50-100 cm en la horizontal, siendo estos muy dependientes de la configuración del terreno (Nelson et al., 2009). (Figura 2.66)

Un sistema LIDAR puede discriminar entre múltiples respuestas recibidas desde la superficie para un mismo pulso, permitiendo determinar las superficies intermedias, como líneas de tensión o coberturas vegetales. En la actualidad, se dispone de varios tipos: los que reconocen hasta 7 pulsos, los que sólo reconocen el primer pulso, los que sólo reconocen el último, los que reconocen el primero y el último, etc. Gracias a la recepción de los múltiples pulsos y a la aplicación de filtros adecuados, se podrá analizar la información recibida, discriminando entre los diferentes pulsos e identificando el tipo de superficie objeto de la medición. (Figuras 2.67 y 2.68)

Los resultados fundamentales de los vuelos LIDAR son (Baltsavias, 1999; Liu et al., 2007):

- Un Modelo Digital de elevaciones, obtenido a partir de la interpolación de los puntos procedentes del último pulso (base de la modelización hidrológica/hidráulica);
- Un Modelo Digital de Alturas de Objetos, obtenido a partir de la interpolación de los puntos del primer pulso, sobre el cual podemos distinguir y cartografiar múltiples elementos que no era posible capturarlos de forma remota hasta el momento, tales como edificios, vegetación, presas, puentes, diques, etc.;
- Un Modelo de Intensidades, donde a partir de la amplitud de la señal que vuelve al avión después de reflejarse en la superficie terrestre obtenemos una imagen

de intensidades que permite realizar distinciones entre superficies, identificando puentes, carreteras, etc.;

- Una Ortofotografía en verdadera proyección, el sistema LIDAR se puede integrar con una cámara digital para obtener imágenes perfectamente georreferenciadas en las que se corrige incluso las distorsiones de paralaje debidas a la topografía.

2.1.1.4.3. Generación de un mdt. Técnicas de interpolación.

Para su construcción, en el caso de que no exista uno comercial, es necesaria la utilización de algoritmos de interpolación que permiten generar una superficie continua a partir de una muestra de puntos acotados o de curvas de nivel.

La interpolación se puede definir como un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral, con un valor estimado), conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales con valores reales).

Para un modelo existen varios procedimientos de interpolación, existiendo diferencias en cuanto a cuál es la organización de la información de partida: puntos o líneas:

A partir de puntos muestrales:

- Métodos directos
 - Generación de polígonos de Thiessen
 - Medias móviles con ponderación de la distancia

- Métodos analíticos
 - Variograma y kriging
 - Análisis de superficie de tendencia

A partir de líneas:

- Interpolación lineal
- Interpolación no lineal

La utilización de cada uno de estos métodos dependerá en cada caso de la variable a interpolar y de la muestra .

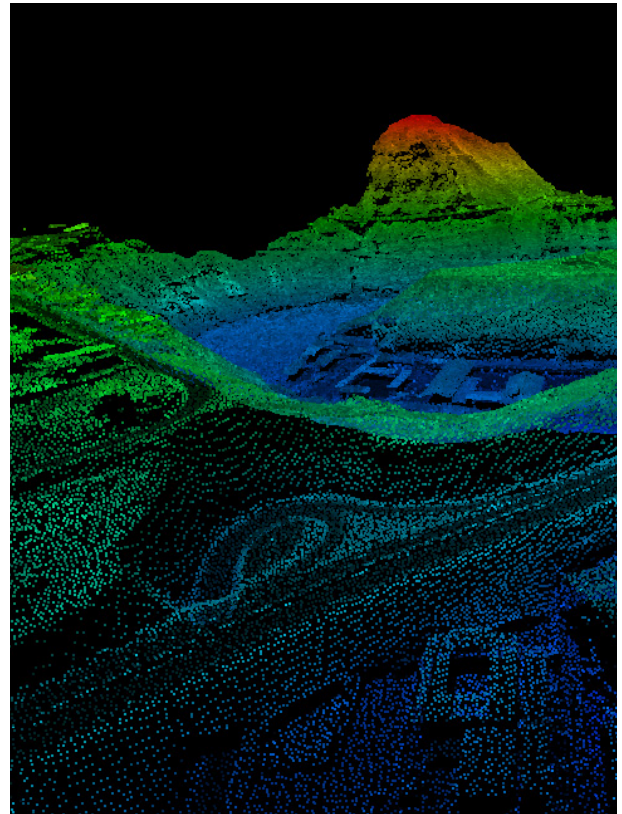
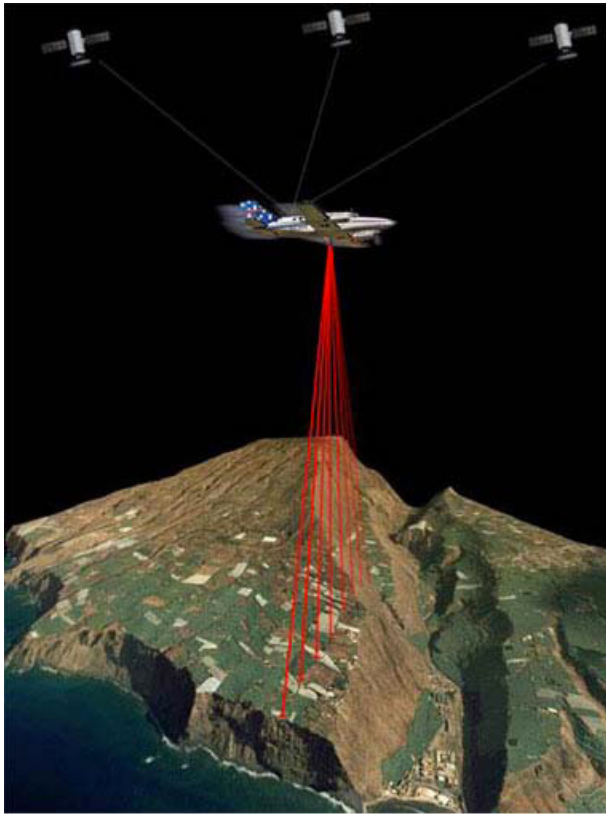


FIGURA 2.66.

FIGURA 2.67.

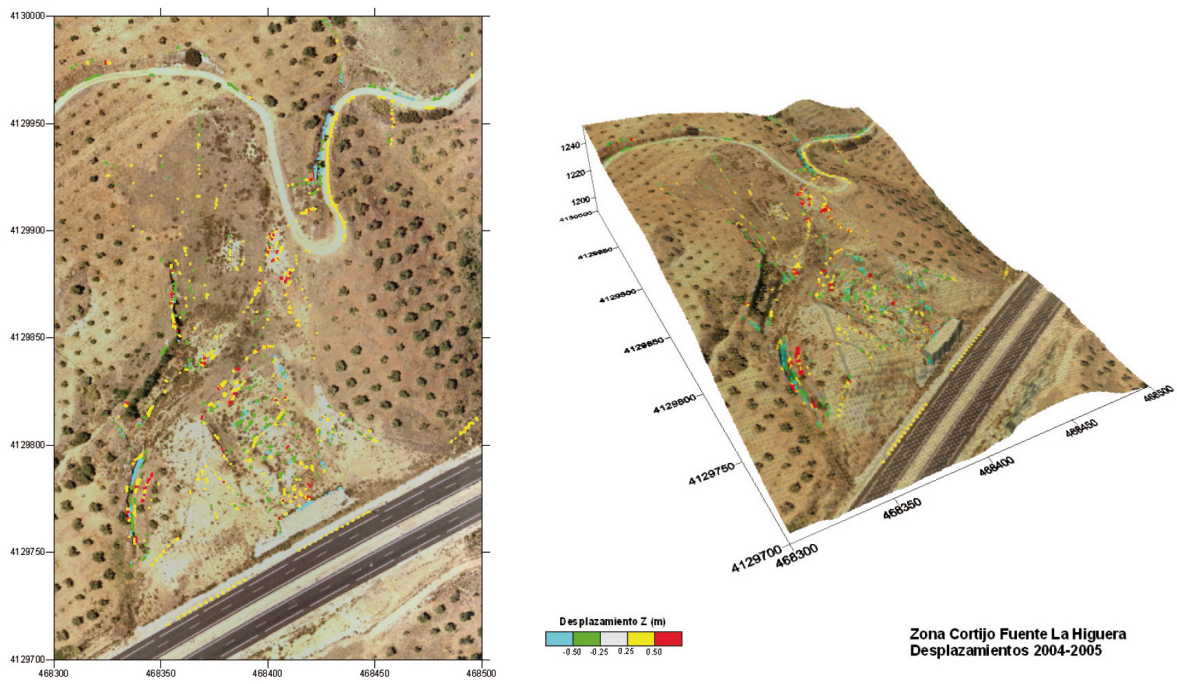


Figura 4.23.- Diferencias detectadas en la zona 2 entre los modelos digitales del vuelo del año 2005 y 2004

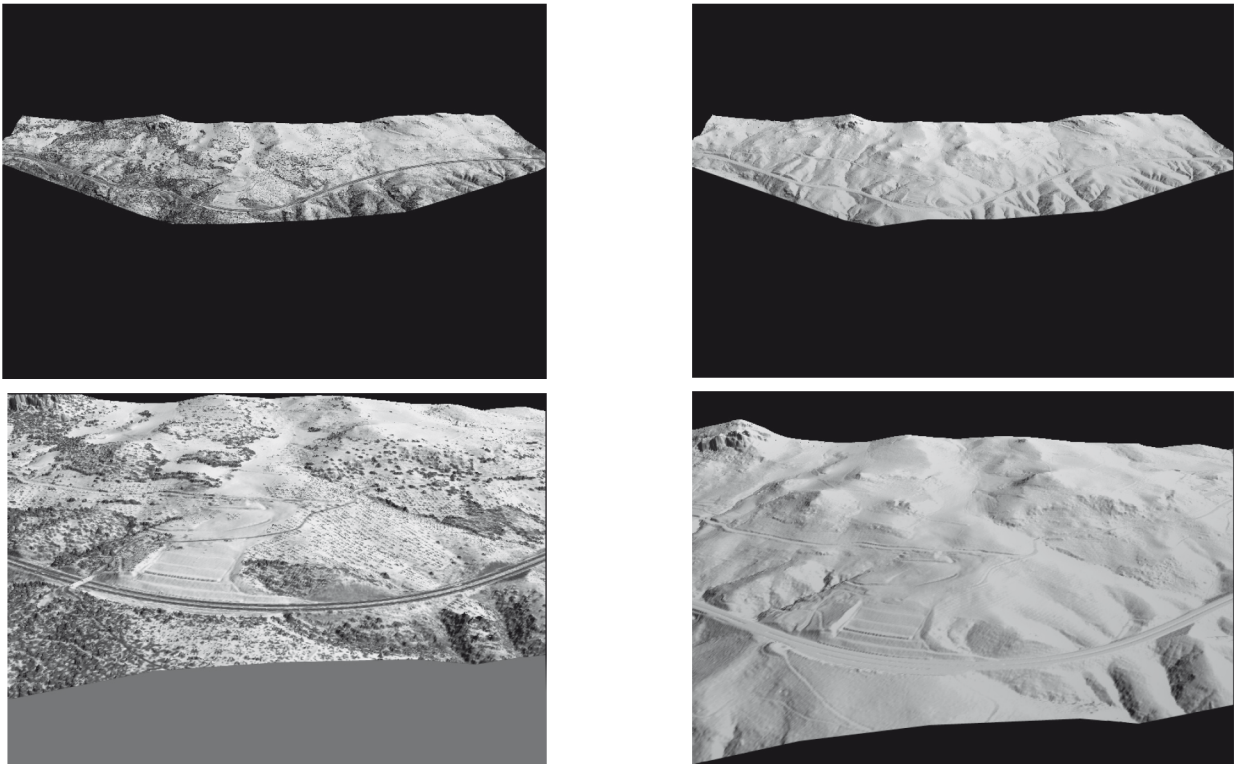
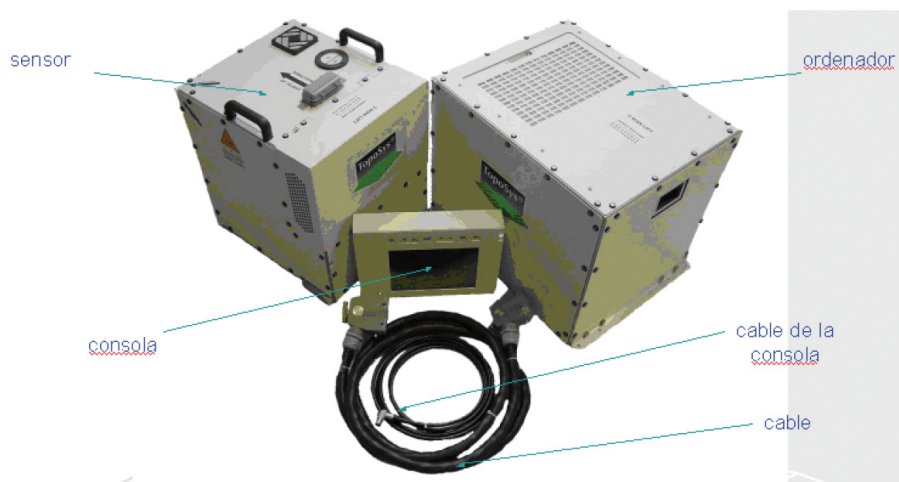


FIGURA 2.68.

FIGURA 2.69.



2.1.2. La expresión cartográfica: Cartografía temática y semiología gráfica.

Se puede definir la Cartografía como la ciencia que estudia los mapas y su realización. Según F. Joly (1979), la cartografía tiene por objeto la concepción, preparación, redacción y realización de los mapas. Comprende “*el conjunto de estudios y operaciones científicas, artísticas y técnicas que intervienen, a partir de los resultados de las observaciones directas o de la explotación de una documentación, en el establecimiento de mapas, planos y otras formas de expresión, así como en su utilización*”. Aunque en la actualidad esté en entredicho, parece que la Cartografía es entendida como un medio de expresión gráfico y una técnica de ilustración que ayuda a la comprensión de los fenómenos georreferenciados.

Un mapa es una representación geométrica plana, simplificada y convencional, de toda o parte de la superficie terrestre, con una relación de similitud proporcionada, a la que se llama escala (Joly, 1979). Según el Instituto Geográfico Nacional, “es un documento que transmite información al usuario, la cual está codificada en forma de símbolos gráficos. Estos símbolos son puntos, líneas o superficies, que están definidos tanto por su localización en el espacio respecto a un sistema de coordenadas, como por alguno de sus atributos no espaciales (nombres, clasificaciones, colores...)”.

Un mapa es una representación de la realidad y no la realidad misma, por lo que para representarla deberemos de utilizar unas convenciones:

En primer lugar la realidad a representar es generalmente volumétrica y por lo tanto podría implicar, o no, un cambio de tres dimensiones a dos. Este cambio de tres a dos dimensiones se suele suplir describiendo la tercera dimensión como un atributo (así por ejemplo una cota de una montaña tendría una localización de coordenadas x e y que podemos leer sobre el mapa y un atributo, z , que sería la altura).

Otro aspecto muy importante es el paso de una superficie irregular, aproximadamente esférica a otra plana. Para ello se utilizan las proyecciones. Las proyecciones sirven para representar sobre un plano la superficie de la Tierra, el geode, con la menor deformación posible, utilizando para ello una red de meridianos y de

paralelos. Existen cientos de proyecciones en función de la forma en la que se da este proceso. Las podemos agrupar en tres sistemas básicos: cilíndricas, cónicas y planas (acimutales o polares). Sin embargo, muchas de las proyecciones no son fáciles de relacionar con estas tres superficies describiéndolas como pseudo, modificadas o individuales. Las cilíndricas utilizan como plano de proyección un cilindro tangente a la superficie de la Tierra. En el segundo caso se trataría de un cono tangente o secante. Y en el tercero el plano de proyección iría tangente a un solo punto. (Ver figura 2.70).

Las principales propiedades de las proyecciones se definen en función de las dimensiones mejor conservadas (o menos deformadas). Las proyecciones conformes no deforman los ángulos, las equivalentes las superficies y las equidistantes las distancias. Así por ejemplo para los mapas de continentes o países de propósito general se utiliza la proyección cónica de dos paralelos estándar, pero si deben mantenerse las áreas se utilizaría la cónica de Bonne con un paralelo estándar.

Una aplicación muy importante de las proyecciones Cilíndricas Ecuatoriales corresponde a la Proyección Universal Transversa de Mercator, llamada comúnmente UTM (iniciales en inglés). Son muchos los países (entre ellos España) que actualmente utilizan la proyección UTM para realizar su cartografía oficial. Para evitar las deformaciones que crecerían rápidamente con la distancia al meridiano de contacto, la proyección UTM emplea distintos cilindros (60 cilindros) que hacen tangencia a meridianos separados 6° entre sí. Con ello se consigue que ningún punto esté más alejado que 3° del meridiano central de su huso, y se controlan las distorsiones que son pequeñas. (Figuras 2.71 y 2.72)

El tercer aspecto a tener en cuenta es la escala. La escala de un mapa es la relación entre éste y la realidad. Si la realidad es una escala 1:1, un mapa a escala 1:50.000 representaría, por ejemplo, 500 m. de una carretera en un tramo de 1 cm. Cuanto menor sea el factor de escala, mayor será ésta y a la inversa. Así hablamos de pequeña escala cuando utilizamos mapas a partir de 1/200.000, de escalas medias entre ésta y el 1/25.000 y de gran escala de ahí hacia abajo. La escala de un mapa será la que determine el nivel de información o de detalle del mismo.

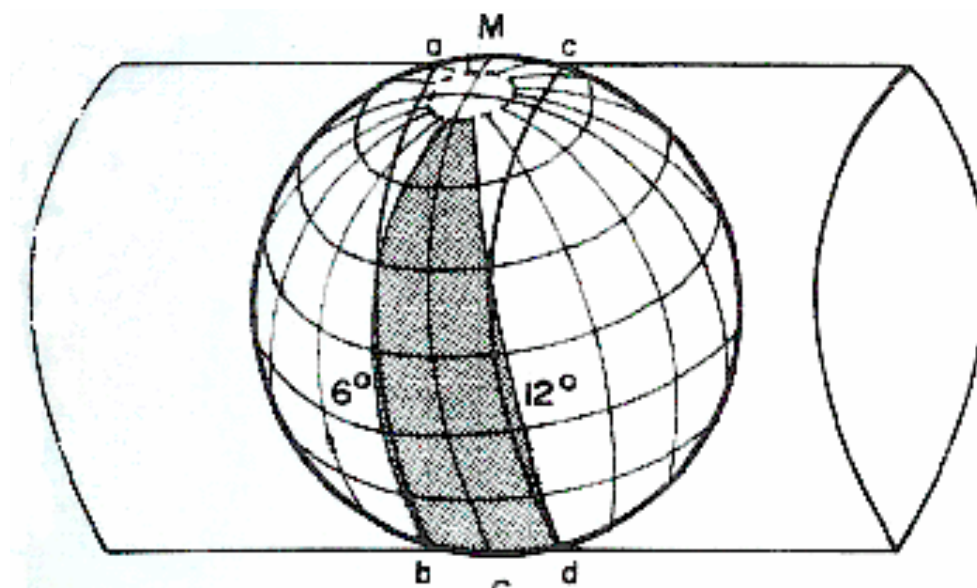


FIGURA 2.70.

Las imágenes siguientes de un mismo ámbito pero a escalas diferentes ilustran esta afirmación. (Figuras 2.73 a 2.76)

Según J. Bertin (1973), se llama imagen a la “forma visual significativa perceptible en el instante mínimo de visión” y no debe confundirse con el mapa propiamente dicho, ya que este es una figura que puede componerse de una o varias imágenes.

Un cartograma es una representación discontinua de fenómenos geográficos mensurables, en forma de figuras proporcionales situadas sobre un fondo cartográfico eventualmente adaptado.

Las anamorfosis geográficas conservan la continuidad del espacio, pero las componentes geográficas (latitud y longitud) se deforman intencionadamente, para que el dibujo muestre las variaciones de una componente cualitativa dada. Ambas representaciones se verán más detenidamente en el capítulo 7.

La expresión cartográfica siempre ha sido un acto creativo y crítico, pero además un mapa debe ser una herramienta gráfica, un documento capaz de transmitir al usuario la información que la persona que lo realiza ha determinado. Para ello, ha de estar sujeto a las normas y convenciones del lenguaje cartográfico, es lo que se denomina sintaxis cartográfica o semiología.

Semiología es la ciencia que estudia los sistemas de signos sean lenguas, códigos, señalizaciones, etc. Un signo (del latín signum) es todo aquello que se refiere a otra cosa, es la materia prima del pensamiento y por lo tanto de la comunicación.

Debido a que el lenguaje cartográfico emplea grafismos para hacer referencia a ‘otras cosas’ es necesario considerar el estudio de sus significados, entender qué tipo de significado se atribuye de una forma natural a grafismos determinados. Si éstos se conocen, será más sencillo diseñar buenos mapas, porque bastará con elegir los signos que lleven al lector a atribuir aquel significado más conveniente.

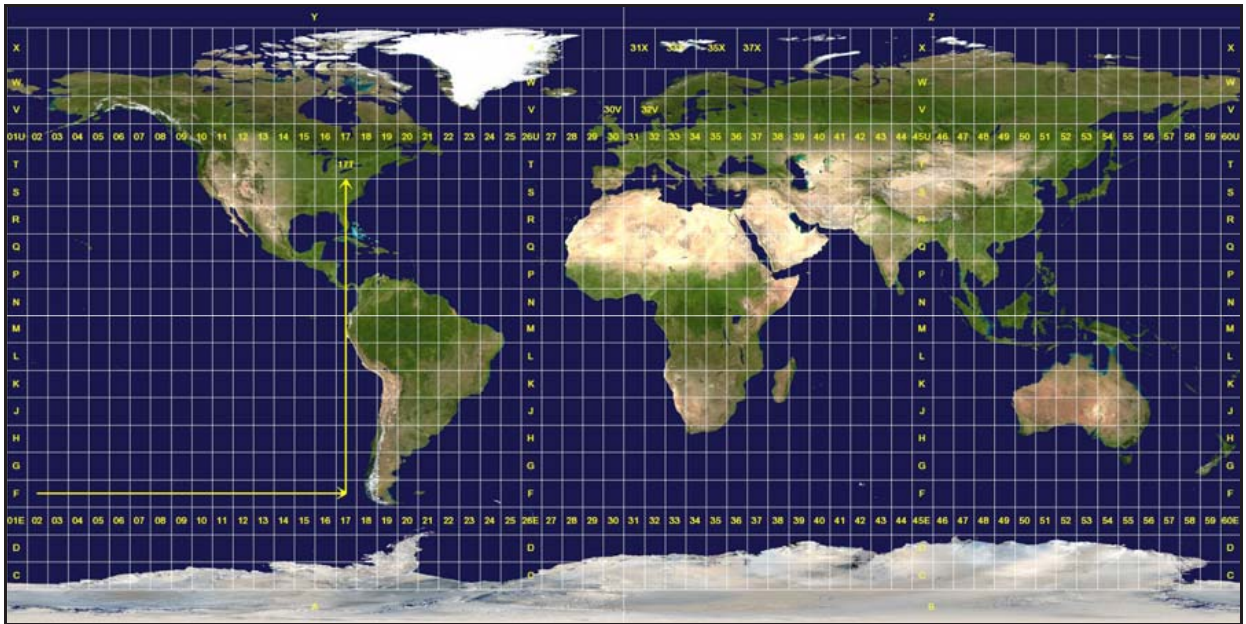
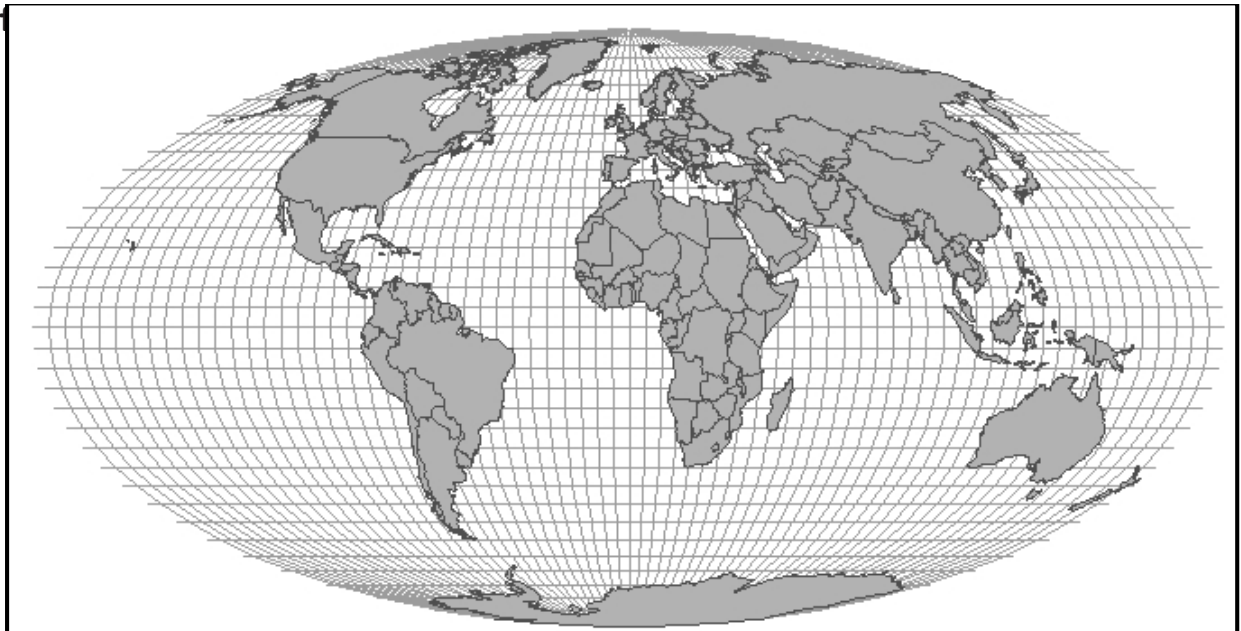


FIGURA 2.71
FIGURA 2.72



Si un mapa es una representación gráfica que muestra algún fenómeno georreferenciable del que conocemos algunos datos que lo definen, se hace necesario dominar tres cuestiones: La dimensión espacial del fenómeno a representar, el nivel de medida de los datos y las posibilidades del lenguaje gráfico o variables visuales.

- La dimensión espacial de un fenómeno se refiere a la dimensionalidad de su ocurrencia. Puede ocurrir pun-

tual, lineal, superficial o volumétricamente. Su representación gráfica debe tener en cuenta la escala, ya que, por ejemplo, una ciudad podría ser graficada como un punto, como un polígono, como varios polígonos o como un conjunto de volúmenes según la escala y el subjetivismo del autor.

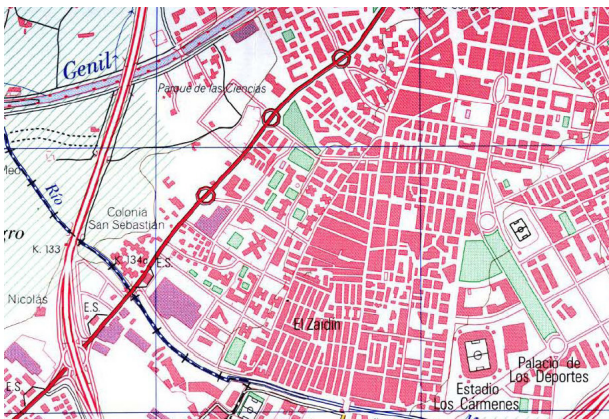
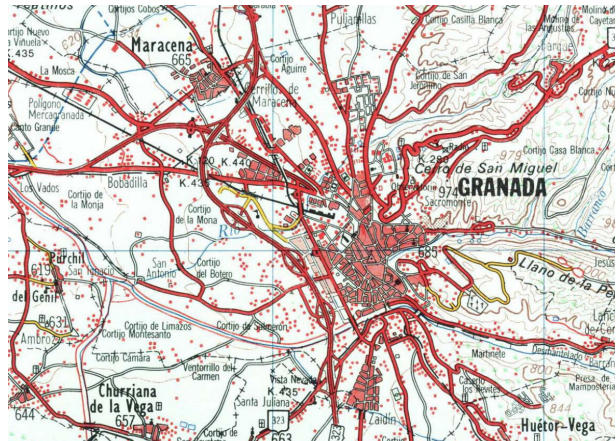
- El nivel o escala de medida se refiere a la colección de cantidades con la que representar un fenómeno en el espacio. Según la información que se posea acerca de

FIGURA 2.73.

FIGURA 2.74.

FIGURA 2.75.

FIGURA 2.76.



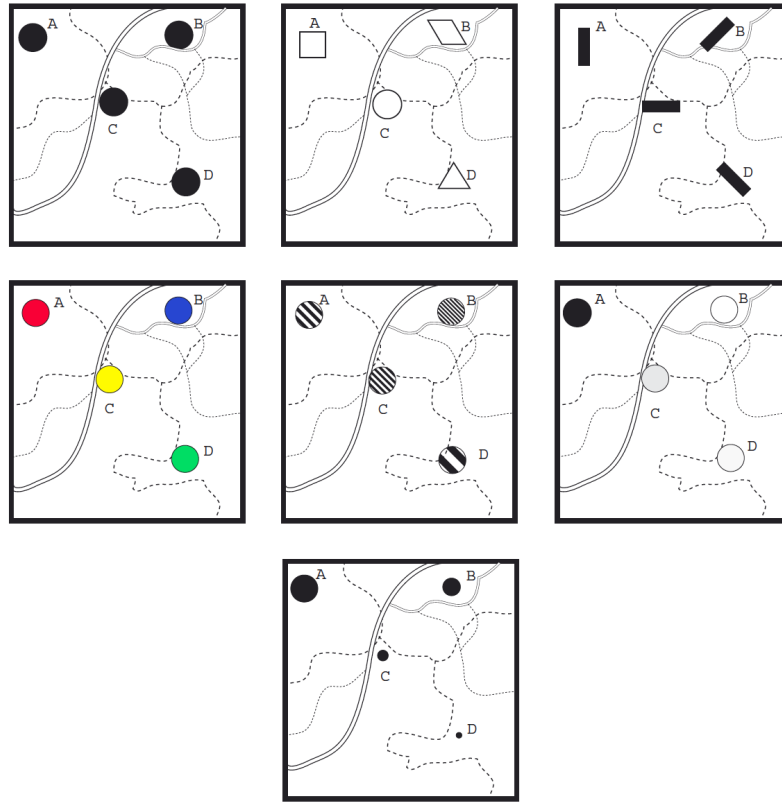


FIGURA 2.77
FIGURA 2.78

Dimensión Visual				
Tipo de símbolo	TAMAÑO	TEXTURA DEL RELLENO	VALOR DEL COLOR	INTENSIDAD DEL COLOR
Puntos		Bajo Medio Alto	Bajo Medio Alto	Rojo flojo Rojo medio Rojo fuerte
Líneas	Porcentaje de flujo de corriente 	Bajo Medio Alto	Bajo Medio Alto	Flojo Medio Fuerte
Áreas	Elevación sobre el NVM >2000 M 1000-2000 M <1000 M 	>2000 M 1000-2000 M <1000 M	>2000 M 1000-2000 M <1000 M	Az. Fuerte Az. Medio Az. Flojo

una variable se definen tres niveles o escalas de medida de los datos que en orden de precisión creciente son la escala de medida nominal, la ordinal y la cuantitativa. Se dice que la escala de medida es cuantitativa cuando entre los datos se establece una jerarquía que es posible definir cuantitativamente. Es el caso, por ejemplo, de tener poblaciones ordenadas por su número de habitantes o un conjunto de países por su producto interior bruto.

- Se denominan variables visuales a aquellas características que diferencian un signo de otro. Dos marcas gráficas dibujadas en un plano (por ejemplo dos puntos), pueden diferenciarse por tener diferente color, forma o tamaño. Los factores que producen estas alteraciones gráficas (como el color o la forma, entre otros) se denominan variables visuales.

Dependiendo de los autores, las variables visuales toman diferentes denominaciones. A continuación se expone la propuesta del cartógrafo francés Jacques Bertin, autor de la primera clasificación aplicada a la cartografía, publicada en su conocido libro "Semiologie Graphique".

Bertin definió y sistematizó la utilización de las variables visuales capaces de proporcionar una tercera dimensión a las dos dimensiones del plano. La expresión 'tercera dimensión' debe entenderse aquí como cualquier característica atribuible a una determinada posición. Por ejemplo, la densidad de población, la temperatura, el tipo de suelo o vegetación.

Las variables visuales según Bertin son siete: posición, forma, orientación, color, valor, textura (o grano) y tamaño. Antes de pasar a analizarlas, se muestran aplicadas a los tres elementos conceptuales que utiliza el sistema gráfico, que son exclusivamente el punto, la línea y el plano. (Figuras 2.77, 2.78).

- La posición se refiere a la situación en X e Y que ubica un símbolo en el mapa. El significado de un objeto varía según su posición, pero en cartografía esta variable no puede ser modificada, porque la posición de los elementos en el mapa está condicionada por su situación real y por tanto es inamovible.

- La forma de un signo es la figura o la determinación exterior que lo distingue. Una serie de posiciones pueden

hacerse visibles en el mapa empleando esta variable visual y diferenciando así unas de otras.

- La orientación es la variación que sucede al girar un símbolo, tal y como se ve en las figuras a continuación.

- El color es la variable visual más poderosa y también la más compleja. El color puede ser descrito de acuerdo a las tres coordenadas denominadas Tono, Valor y Saturación que a su vez pueden variar de forma independiente.

Tono: Es la longitud de onda que define el color. Es el nombre por el que nos referimos al color; rojo, verde, azul o violeta. (En esta clasificación el término color hace referencia al tono.)

Valor: Es la cantidad de luz reflejada por el color, su claridad u oscuridad. Es el caso de tener un verde oscuro, verde intermedio y verde claro. Puede compararse con una escala de grises y se considera una variable visual aparte.

Saturación: Hace referencia a la pureza o intensidad de un color. Al perder saturación en los colores aumenta el gris, y resulta difícil referirse a ellos por el nombre de un tono o color.

Se emplean distintos términos dependiendo del autor; matiz (en lugar de tono), brillo, luminosidad o claridad (en lugar de valor) y pureza o intensidad (en lugar de saturación).

- La anterior propiedad del color al poder ser aplicada a una escala de grises, es en sí misma una variable visual importante. El valor es la cantidad de luz reflejada por el color y es comparable a una escala de grises.

El color negro absorbe toda la luz que incide sobre él, no refleja luz y se dice por tanto que tiene un valor del 0%. El blanco por el contrario, refleja toda la luz incidente con lo que su valor será del 100% (devuelve el 100% de lo que le llega). Un gris claro refleja mucha de la luz incidente pero no toda (por ejemplo el 90%) y uno oscuro muy poca aunque refleja algo (por ejemplo sólo el 10%). El negro y el blanco, son los extremos de una serie en la que hay toda una infinita gama de valores o grises.

- El tamaño se refiere a la dimensión del símbolo. En el caso de geometrías de superficie hace referencia a la

dimensión de los elementos individuales que conforman su relleno o tramado.

- La textura consiste en la ampliación/disminución fotográfica del relleno de una estructura visible o trama aplicada al relleno de un elemento. Se diferencia del tamaño en que la proporción blanco y negro debe permanecer constante. Bertin la considera una variable como las demás, pero su aplicación es difícil y su lectura también genera cierta confusión.

Con la leyenda de un mapa se puede decodificar el mensaje cartográfico pues en ella se explican el significado de la simbología utilizada. La leyenda es necesaria para entender el mapa de una forma completa y exacta. Por eso es importante cuidar su diseño. La leyenda indica aspectos concretos y exactos del tipo: “el círculo de gran tamaño representa ciudades de más de un doscientos mil habitantes, y el pequeño ciudades de entre cien mil y doscientos mil habitantes”, “lo representado en color verde claro son olivos y lo representado en rosa suelo desnudo”.

No obstante, más allá de la explicación de la leyenda, la percepción humana de una forma natural atribuye ciertos significados a los signos según la variable visual que se haya empleado para su diferenciación.

El significado atribuido en cada caso depende de si la variable visual posee o no ciertas propiedades perceptivas: la propiedad perceptiva asociativa, la ordenada, la cuantitativa y la selectiva. Estas propiedades conforman el fundamento de la “gramática cartográfica”. Conociendo las respuestas perceptivas ante determinados estímulos gráficos, se deben elegir aquellas simbologías que provoquen reacciones acordes al mensaje que se desea transmitir y evitar las que confundan al lector.

- Propiedad perceptiva asociativa: Es la propiedad que aplicada a una simbología provoca una respuesta perceptiva del tipo: “entre los elementos parece haber diferencias de esencia o cualidad, aunque todos ellos parecen tener la misma de importancia, y no es posible ordenarlos siguiendo un criterio objetivo”.

Este tipo de percepción sucede al utilizar las variables visuales forma y color por ejemplo. Entre un cuadrado, un círculo y una estrella de igual color y tamaño, nuestra

percepción no establece un orden. Lo mismo sucede con el color.

- Propiedad perceptiva ordenada: Provoca una respuesta perceptiva del tipo: “en este conjunto de elementos claramente unos son más importantes que otros y es posible establecer un orden inequívoco entre ellos”. Esta percepción sucede al aplicar la variable visual “valor” a una simbología: “en este conjunto de elementos los oscuros son los más importantes. Pierden importancia según se van aclarando hasta llegar al elemento más claro de todos, que es el que parece tener menor importancia.” Este tipo de percepción sucede al utilizar las variables visuales valor y tamaño.

- Propiedad perceptiva cuantitativa: Cuando un conjunto de signos difieren sólo en su tamaño, la respuesta perceptiva es del tipo: “en este conjunto los elementos más grandes son los más importantes, perdiendo importancia según decrece su tamaño hasta llegar a los elementos más pequeños, que son los de menor importancia.” Lo que es exactamente la propiedad perceptiva ordenada anterior. La diferencia es que cuando una variable posee esta propiedad además de ordenar, es posible cuantificar visualmente esas diferencias y extraer ideas del tipo: “en este conjunto de elementos los grandes son cuatro veces los pequeños.” Esta propiedad perceptiva sólo la posee el tamaño.

- Propiedad perceptiva selectiva: Esta propiedad hace posible que en una serie de grafismos se puedan aislar visualmente unas categorías de otras, permitiendo ver la cómo es la distribución en el espacio de una sola categoría sin que “moleste” la representación de otros grafismos.

Por ejemplo, al utilizar la variable visual forma para una serie categorías es difícil visualizar una sola en el mapa y comprender su distribución. Sin embargo el color, el valor y el tamaño lo permiten. Lógicamente esta propiedad es de gran interés en cartografía.

Cartografía temática:

Según D. J. Cuff en su “Thematics Maps”, la cartografía suele dividirse en dos grandes grupos: Por un lado la llamada básica, fundamental o topográfica, formada por los mapas topográficos, las Cartas Oceánicas y las

Cartas Aeronáuticas, y por otro lado la Cartografía temática.

Esta última, según la ICA (Asociación Cartográfica Internacional), se define como *el conjunto de actividades cartográficas tendentes a mostrar las características estructurales de una determinada distribución geográfica*, y generalmente se divide en Cualitativa si se muestran las clases en las que se puede descomponer un acontecimiento, y Cuantitativa, si se muestran las distribuciones numéricas de este.

Los **mapas cualitativos** son aquellos que definen cualidades no relacionadas con cantidades. Estos mapas comprenden la mayoría de cartografía relacionada con la geografía física. Así por ejemplo, el mapa geológico, el geomorfológico, el edafológico o de suelos, o el mapa de cobertura vegetal corresponden a mapas temáticos cualitativos.

Según el tipo de información que se posea acerca de un conjunto de datos, se dice que está en una determinada escala de medida. En orden creciente de precisión las escalas de medida de los datos son:

- Escala de medida nominal:

Corresponde a la asignación de una característica no numérica a un elemento o fenómeno, la cual simplemente pretende establecer comparaciones de tipo cualitativo entre los diferentes elementos.

Es el caso de la agrupación de los suelos en arenosos, arcillosos y limosos. En esta clasificación cada elemento es diferente a los otros, su esencia es distinta. Sólo con esta información no es posible imponer un orden objetivo entre los elementos y de ellos sólo es posible afirmar que son diferentes.

En un mapa general una carretera, un río y un ferrocarril son elementos diferentes, su esencia es distinta, pero no es posible imponer entre ellos jerarquía alguna; de ellos sólo podemos afirmar que son diferentes.

- Escala de medida ordinal:

Permite establecer entre los datos un cierto orden o jerarquía objetiva, sin que sea posible expresarla por medio de cifras o números. Se proporciona el orden de las variables de inferior a superior, pero no se ofrece ninguna definición de los valores numéricos. El mapa presentado a continuación, muestra datos medidos en

escala ordinal, pues en él se representan los núcleos de población clasificados según su importancia (capital, ciudad y pueblo). Otro tanto sucede con las vías de comunicación clasificadas en las categorías autovía, carretera principal y carretera secundaria.

- Escala de medida cuantitativa:

Tener los datos en este tipo de escalado implica la asignación de una característica numérica al elemento o fenómeno. La densidad de población o el número de habitantes de un municipio son ejemplos propios de esta escala.

Los mapas de símbolos proporcionales son muy utilizados en cartografía temática cuantitativa, pues son fáciles de elaborar e interpretar ya que la asociación de cantidades a tamaños resulta universalmente intuitiva. Esta técnica emplea precisamente este principio; se representan cantidades utilizando una forma fija cuyo tamaño varía en proporción al dato a representar. Históricamente los símbolos proporcionales se han utilizado para representar datos socioeconómicos, pero en la práctica éste es un método válido para representar cualquier dato cuantitativo en formas diversas, incluyendo valores totales, proporciones y razones, excepto densidades, para las que es mejor utilizar simbología superficial (coropletas).

Para finalizar este apartado es necesario citar otro tipo de cartografías muy útiles en cualquier proyecto de planificación. Al mapa formado por fotografías aéreas o imágenes de satélite transformadas para eliminar la deformación de la proyección cónica y convertirlas en ortogonales, se denomina Ortofotomapa.

2.1.3. Nuevas Cartografías y técnicas de visualización.

La Cartografía moderna se entiende como un complejo proceso de organización, acceso, representación y manejo de información geoespacial mediante el uso de mapas; concebidos estos no sólo como una representación gráfica del espacio geográfico, sino también como un portal dinámico para interconectar y distribuir información geoespacial (MacEachren y Kraak, 2000).

Entendida como herramienta para la comunicación, ésta debe permitir la comprensión del espacio y de las rela-

ciones dinámicas y procesos que se desarrollan en él. La figura 2.79 MacEachren (1994) expresa, mediante un cubo, cómo la Cartografía permite, por un lado, la investigación, análisis e interpretación de la realidad geográfica, actuando, por otra parte, como medio para divulgar o comunicar los resultados de este proceso de investigación y cambiando su nivel de especialización a medida que cambia su finalidad. Esto le confiere una especie de carácter dialéctico al ser fin y medio simultáneamente. (Bosque et al. 2002).

2.1.3.1. La Geovisualización y la Visualización Científica

La Visualización científica es un campo de la Computación Gráfica dedicado a la exploración del potencial analítico y comunicacional existente en la interpretación visual. Se parte de la suposición fundamental de que este proceso visual induce a apreciaciones intuitivas de las características más destacadas de la información. Al ser vinculada a la Cartografía permite resaltar y, por ende, interpretar y analizar los aspectos más significativos de la información espacial (Taylor, 1991).

Es una herramienta compleja que demanda arte, imaginación e intuición en sus aplicaciones; tiene una importante base teórica, en la que se relacionan el proceso cognoscitivo (mediante la investigación y análisis de la información y de sus aplicaciones), la comunicación (mediante el uso de nuevas técnicas de comunicación) y la formalización a través del uso de las tecnologías informáticas existentes. (Taylor, 94) (MacEachren y Kraak, 97) (figura 2.80).

Es posible considerar, como expresa Bosque (2002), que la Cartografía, en la actualidad, se encuentra vinculada a la Visualización científica, que *se define como el uso de complejas tecnologías informáticas para crear imágenes visuales, a fin de facilitar la comprensión y resolución de problemas* (Kraak y Omerling, 1996). Esto abre nuevas vías para potenciar el análisis de los fenómenos geográficos (figura 2.81) creando un nuevo universo de posibilidades a los mapas, ya que al actuar los mapas casi como “telescopios” o “microscopios” para profundizar en algunos aspectos de la realidad (Rod, 1997), podemos conocer aspectos más complejos y detallados de la misma.

El uso de las posibilidades que brinda el desarrollo de hardware cada vez más eficiente, orientado a la computación gráfica, facilita desarrollar métodos capaces de reconstruir paisajes y modelar ambientes mediante la estimulación de los sentidos (visión, equilibrio, audición, tacto, olfato) es decir, permite crear la denominada realidad virtual (Dorling y Fairbairn, 1997).

El uso de estas nuevas herramientas tecnológicas, cada vez más diversas y potentes, permite profundizar en la comprensión de los fenómenos espaciales, dado que la percepción visual, como medio tradicional para la comunicación de información, se ve ampliada con la “percepción multisensorial”, ya que la Visualización científica incorpora elementos como el audio, vídeo y la realidad virtual en el proceso de exploración y análisis de la información espacial, redimensionando las posibilidades comunicacionales de los mapas.

La Visualización Geográfica o Geovisualización, se puede definir como uno de los vínculos que el desarrollo tecnológico ha generado entre la exploración y procesamiento de datos espaciales, a través de los SIG, las tecnologías de información visual, desarrolladas en la Visualización Científica y la Cartografía. La Visualización Geográfica se ha convertido en un área de investigación y, a su vez, en un grupo de herramientas que permite cambiar y ampliar las posibilidades de investigar, conceptualizar y explorar información georreferenciada, a fin de ayudar a la toma de decisiones y a la comprensión del mundo, ya que facilita la explicación, análisis, síntesis y representación de la información geoespacial (MacEachren, 1998 y 1998b).

Esta Visualización Geográfica es una temática emergente y que promueve la convergencia de diversas disciplinas y campos científicos. La propia Asociación Internacional de Cartografía creó una comisión específica en 1999 para ello (Commission on Visualization and Virtual Environment). El concepto visualización alude a la transmisión de información y conocimiento a través de imágenes dirigidas a la vista, en este caso de información geográfica, lo cual, unido a la posibilidad de incorporar la tercera (3D) y la cuarta dimensión (tiempo) enriquece su utilidad desde la perspectiva de su utilización en las ciencias de la Tierra (todas con una clara dimensión espacio/temporal). Desde esta perspectiva, al centrarse en la difusión de información y conocimiento del medio

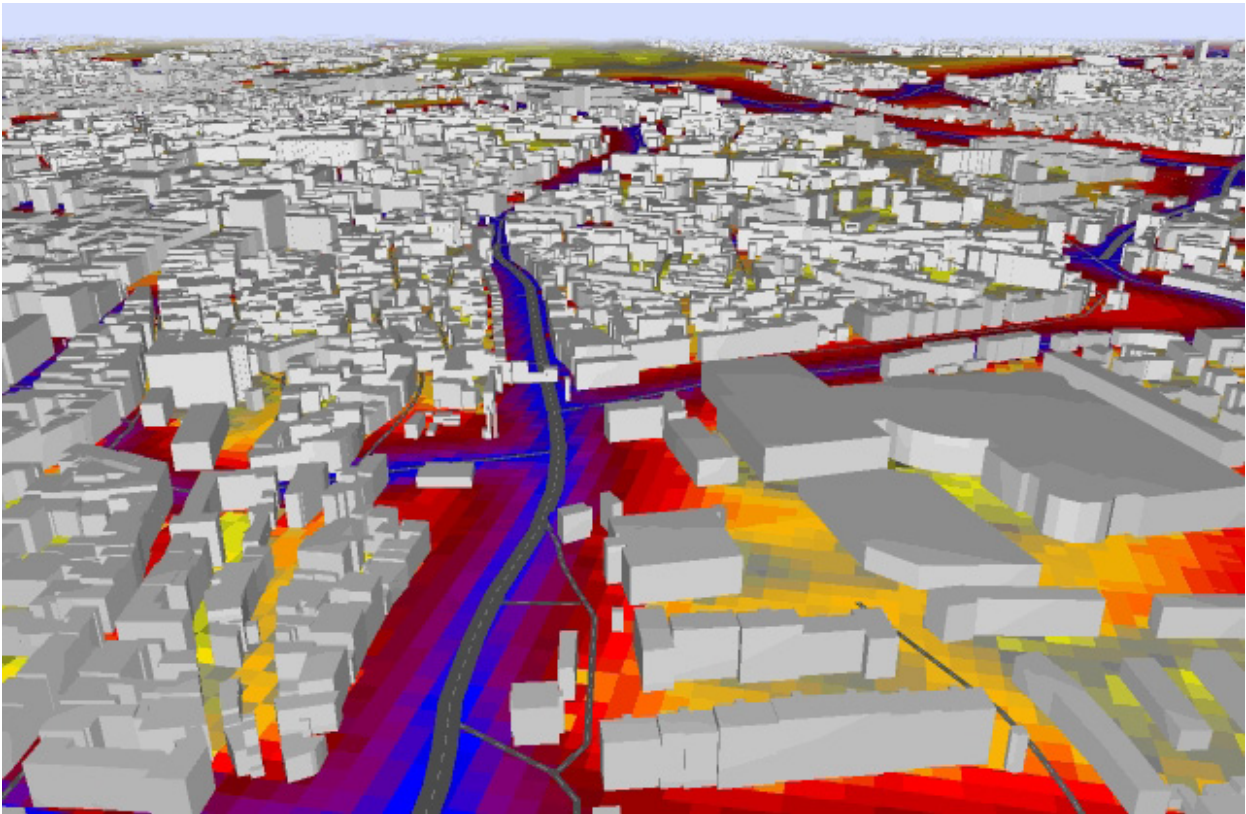
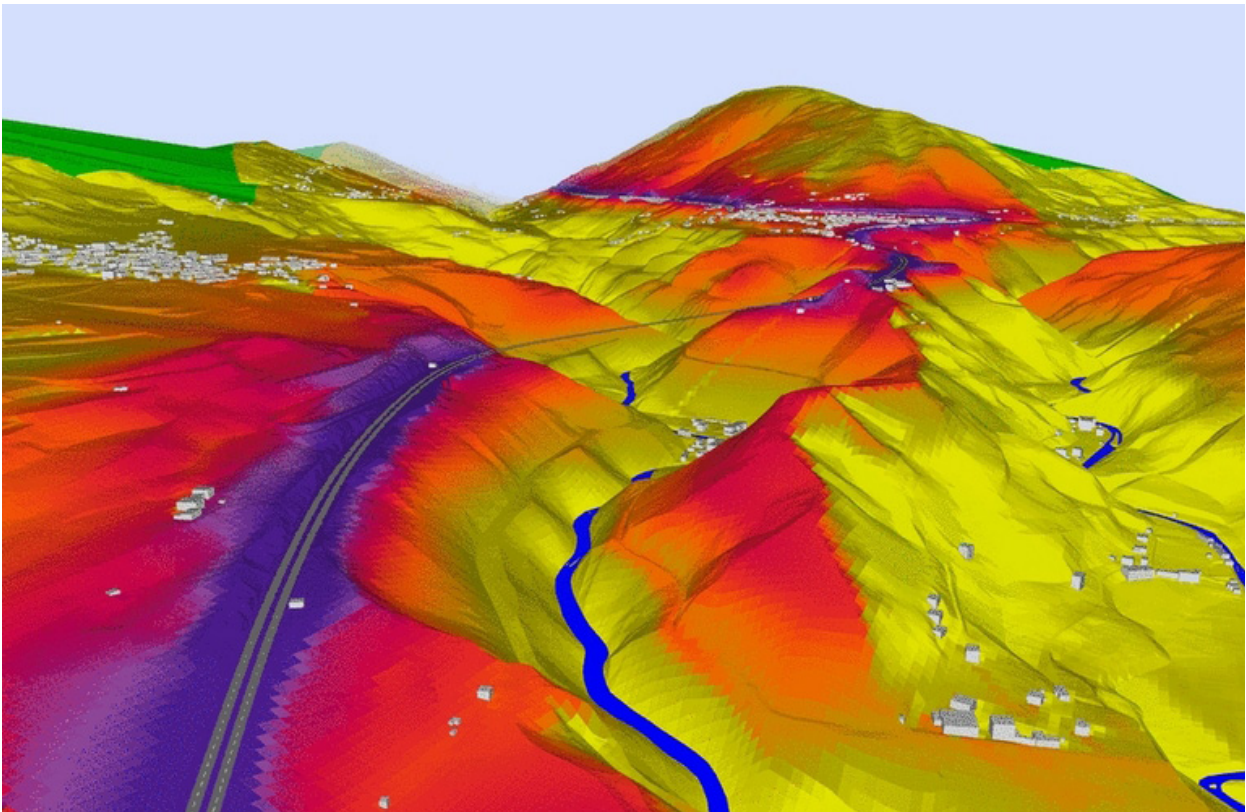


FIGURA 2.79
FIGURA 2.80



natural, la geovisualización 3D proporciona un entorno visual más próximo a la realidad. En este apartado es reseñable la denominada realidad aumentada (Augmented Reality, AR) como forma de combinar una visión real del mundo y elementos virtuales generados por computador, permitiendo mejorar la percepción visual de sus usuarios mediante la superposición de objetos virtuales.

La dimensión temporal exige datos multitemporales, y para ello, un recurso cada día más accesible es la utilización de servicios interoperables de información geográfica a través de la WEB (Servicios OGC). Sin embargo, el entorno de Internet y los usuarios generalistas exigen el desarrollo de herramientas de visualización de utilización sencilla (visores) que tengan estas capacidades. Para la visualización en Internet, por otra parte, es aconsejable que el software pueda ser embebido en los navegadores aunque sea necesaria la utilización de un “plugin” que permita ejecutar las funciones de visualización 3D para los que no están preparados y, a su vez, que soporte los servicios interoperables OGC. A todo lo anterior se suma el hecho de que las imágenes visuales

(2D, 2.5D y 3D) deben sustentarse en un adecuado tratamiento semiológico de los datos para que la información sea correctamente transmitida al usuario, lo cual no deja de ser un reto que entronca directamente con la disciplina tradicional de la semiología gráfica (Bertin, 1967).

Hoy en día no es posible imaginar un mundo sin Internet. En 1992 nació el Word Wide Web, en 1995 se universaliza el correo electrónico y en 1999 se configuran tal y como hoy los conocemos los sistemas de intercambio de archivos y se inicia la era de Google y de las grandes plataformas o buscadores comerciales. Hoy en día son más de 1.000 millones los usuarios de la red y las cifras de las tasa de crecimiento siguen teniendo dos dígitos, especialmente en Asia y América latina. Todo ello ha provocado importantes cambios en los hábitos de comportamiento y la socialización de la información. De los SIG se ha pasado al desarrollo de las infraestructuras de datos espaciales, a los webmapping, los servidores de mapas y los geoservicios, y del férreo control de la información por parte de los gobiernos, al impulso de

FIGURA 2.81



proyectos de autoría colectiva (tipo Wikipedia) basado en la cooperación y en el reparto de activos y recursos.

2.1.3.2. Geoinformación y redes sociales.

La geoinformación como se ha visto, tiene dos elementos fundamentales. Por un lado la cartografía base o topográfica, que es la que llevan a cabo las instituciones de cartografía como el Instituto Cartográfico de Andalucía (ICA) o el Instituto Geográfico Nacional (IGN), utilizando datos territoriales, de infraestructuras, de carreteras, de comunicaciones etc. Y por otro lado, la cartografía temática, que permite introducir datos de diferente naturaleza sobre estos mapas base y permiten darle un sentido diferenciador a la cartografía (Cultura, Sanidad, educación, Medio Ambiente, etc.). Ambos tipos de datos son complementarios y van unidos en la difusión de información (Moren, 2010).

A estos dos elementos fundamentales se ha unido en la actualidad un nuevo tipo de información que es la producida por los usuarios, esta información no normalizada, y de “dudosa validez oficial”, va a comenzar a tener un valor incalculable en la cartografía actual ya que cada vez mas aparecen aplicaciones que permiten la introducción de este tipo de información en los que Internet juega un papel fundamental.

Este espíritu de colaboración hace que, por ejemplo, cada hora se introduzcan en Google Maps más de 10.000 actualizaciones de cartografía. La contrapartida, “la calidad de la información es una incógnita”. Sin embargo, a pesar de esto, no podemos dejar de mirar este fenómeno social que aporta tantísima información (Masso, 2009).

Los geobrowsers son un medio increíblemente eficaz de visualizar el planeta. Keyhole, empresa estadounidense, dio a conocer el primer geobrowser (navegador de mapas) comercial en 2001. Google adquirió Keyhole en 2004 y en 2005 lanzó Google Earth. Desde entonces su versión básica, gratuita, se ha descargado más de 300 millones de veces.

En 2004, la Agencia Espacial de Estados Unidos (NASA) hizo público otro geobrowser, llamado World Wind. Más de 20 millones de copias están en uso. Pero el principal rival de Google en la navegación de mapas es Microsoft.

Tanto Encarta, la enciclopedia de Microsoft, como TerraServer, proyecto de base de datos en demostración, tenían características de geobrowser en los años 90. A finales de 2005 Microsoft compró GeoTango, que contribuyó al desarrollo de Live Search Maps, un geobrowser con base en la web que utiliza datos de Virtual Earth, el modelo digital del planeta de Microsoft. (Google proporciona también un geobrowser con base en Internet a través de Google Maps). Por su parte, Google confía en los proyectos de “participación masiva” y recluta a sus usuarios para que construyan y aporten imágenes, modelos de 3D de edificios y otra información para enriquecer su planeta digital. Hasta ahora, los usuarios han contribuido con millones de anotaciones y más de un millón de imágenes. Wikipedia, que utiliza un sistema similar, está también disponible en Google Earth. Los usuarios pueden leer los artículos de Wikipedia colocados en el globo usando “geoetiquetas”, coordenadas espaciales codificadas en cada entrada. Otros sitios, como Flickr, el principal sitio en el que se comparten fotografías, y YouTube, de Google, también aportan geoetiquetas.

En la actualidad, el entusiasmo más febril se relaciona con la combinación de mapas virtuales con otras fuentes de información en aplicaciones híbridas denominadas Mash-ups. Uno de los ejemplos más tempranos, housingmaps.com, creado en 2005, combina anuncios de departamentos de Craigslist.org con Google Maps. Desde entonces, los mashups se han vuelto comunes: Google afirma que sus mapas son usados en más de 4 millones de aplicaciones de ese tipo. En España destaca Goolzoom como integradora de cientos de mapas y enlaces.

Los Geoportales y las redes geosociales van a jugar un papel fundamental los próximos años, estas redes, son redes sociales tradicionales (Facebook, Twitter, Myspaces, etc.) en las que los servicios geográficos y las funcionalidades, como la geoetiquetación se podrán utilizar para habilitar una dinámica social y de colaboración adicional. Los datos de localización enviados por el usuario o las técnicas de geolocalización, permitirán a las redes sociales conectar y coordinar usuarios con la población local o eventos que coincidan con sus intereses. En las redes sociales para móviles, la información de localización escrita o el seguimiento de teléfonos móviles pueden permitir servicios basados en localización para enriquecer el valor y la información suministrada, permitiéndonos interactuar con respecto

a nuestra ubicación y al tiempo, dos valores esenciales en la sociedad actual.

2.1.3.3. Cartografía multimedia, interactividad y animación

La cartografía temática contiene, por regla general, una gran cantidad de información. Una vez decidido cómo realizar una clasificación óptima de los datos o escogida la gama adecuada de colores, se plantea cómo organizar la información que se tiene para mostrar del mejor modo posible los mapas obtenidos en un soporte como la Web o un CD, es decir, para visualizar esa cartografía en pantalla, cosa por otro lado cada vez más común. La diferencia entre mostrar un mapa en papel y en pantalla es considerable. Hay que tener en cuenta aspectos como la maquetación, la navegación, el diseño, la tipografía, los tamaños de los elementos, etc.

Pero además, puede ser necesario valorar la posibilidad de introducir en el mapa elementos interactivos o dinámicos, lo que puede mejorar notablemente la presentación y comprensión final del mapa, y es una herramienta de máxima utilidad que permite la visualización en pantalla: las aplicaciones multimedia.

El lenguaje multimedia se puede definir como la comunicación en más de una forma, como la búsqueda de los mejores componentes para construir un producto final unitario y coherente a partir de elementos sueltos y dispares, sin interferencias ni ruidos, de manera que la comunicación sea más efectiva; una aplicación multimedia contiene diversos elementos como textos, gráficos, sonidos, movimientos (animaciones) e interactividad, todos ellos integrados con un objetivo definido y no siempre utilizados de la forma tradicional. Cada elemento del diseño multimedia ha de tener sentido como parte del todo.

Se define como multimedia la “*combinación de informaciones de naturaleza diversa, coordinada por el ordenador y con la que el usuario puede interactuar*” (Díaz et al, 1996). Multimedia se compone, de combinaciones entrelazadas de elementos de texto, arte gráfico, sonido, animación y vídeo.

Es conveniente utilizar multimedia cuando las personas necesitan tener acceso a información electrónica de

cualquier tipo. Multimedia mejora las interfaces tradicionales basadas solo en texto, y proporciona beneficios importantes que atraen y mantienen la atención y el interés.

En este sentido, lo que el soporte multimedia puede aportar a la cartografía se intuye bastante importante, por la propia naturaleza de la información cartográfica, con muchos datos y no siempre fácil de comprender por todos los usuarios.

No hay que confundir una aplicación multimedia con aplicaciones dinámicas e interactivas. En este caso, el multimedia es el soporte, por el hecho de contener información de diferentes tipos, pero es una información totalmente estática y sin ninguna interactividad posible por parte del usuario.

Como interactividad se entiende la capacidad del usuario final de modificar el curso de las acciones ocurridas, mediante eventos realizados por él mismo. En el caso de las aplicaciones multimedia para pantalla, el usuario puede modificar el curso de las acciones de tres modos:

- Mediante pulsaciones de ratón.
- Mediante pulsación de teclas del teclado.
- Mediante pulsación de botones específicamente realizados en la aplicación para ser accionados.

Un mapa es interactivo si permite que el usuario entre en juego y participe activamente en la acción que se desarrolla.

La interactividad permitirá al observador de un proyecto multimedia:

- Controlar cuándo desea ver los elementos, teniendo cierto control sobre la información que se le presenta.
- Decidir si quiere ver o no distintas informaciones simultáneamente o no.
- Acceder a toda la información del multimedia en diferentes momentos y de diferentes maneras, siempre que esté adecuadamente diseñada la interactividad y la navegación.

La interactividad es una herramienta muy útil a la hora de diseñar cartografía multimedia, pues permite involucrar al usuario en las acciones de la aplicación, de

forma que se vuelve una plataforma educativa de gran utilidad.

Google Maps es un buen ejemplo de mapa multimedia e interactivo. Es multimedia porque consta de todo tipo de información: texto (datos sobre negocios, etc), imágenes y vídeos (servicio panorámico), imágenes 3D (servicio StreetView), y es interactivo porque en todo momento precisa de la intervención del usuario para mostrar toda su información y todo su potencial.

Mapa: Google Maps Web: <http://maps.google.es/>.

En estos mapas se encuentran todo tipo de elementos acompañando al mapa:

- Textos y vídeos informativos de los lugares.
- Imágenes de lugares (generalmente creadas por los usuarios).
- Imágenes 3D (servicio StreetView).

Con la interacción del usuario es como se accede a toda la información, pulsando sobre una imagen, seleccionando el símbolo del servicio StreetView, escribiendo una dirección o servicio, etc. Google Maps funciona bajo peticiones del usuario, es totalmente interactivo, y esto favorece la comprensión de la gran cantidad de información que contiene cada mapa, puesto que si no hubiera interactividad y se mostrase toda la información simultáneamente, la comprensión resultaría tediosa y compleja.

En un mapa interactivo como el del ejemplo, cada usuario accede a lo que le interesa del mapa, no toda la información es necesaria para todos los usuarios. El usuario tiene el control, el diseñador debe conseguir que esa información esté accesible e indicar cómo acceder a ella fácilmente, pero no debe tratar de mostrarlo todo, sino de organizarlo de tal manera que no asuste al lector y le anime a descubrir todas las opciones de interacción.

El dinamismo en las aplicaciones multimedia se entiende como el movimiento de los elementos que componen esa aplicación. No debe confundirse el dinamismo con la interactividad, pues un mapa dinámico puede no contener interactividad, porque no permita intervenir al usuario en ninguna acción de la aplicación. Aunque generalmente toda aplicación dinámica tiene algo de interactividad,

aunque sólo sea para permitir al usuario decidir cuándo quiere comenzar a ver la animación.

Un ejemplo de las animaciones en mapas multimedia son los mapas históricos o de migraciones, en los que aparecen flechas que se mueven simbolizando el paso del tiempo. Es un buen método para representar el tiempo como variable.

Ejemplos de mapas animados, con y sin interactividad asociada:

- Mapa: March of Democracy
- Web: <http://www.mapsofwar.com/images/Democracy.swf>. [2009, Agosto].

Es un mapa animado, con apenas interactividad, únicamente se permite al usuario iniciar (pulsando PLAY) y parar la animación (pulsando PAUSE).

En este mapa no se permite el desplazamiento por la barra cronológica, únicamente pausar y continuar. Esta sería una opción que mejoraría el mapa final pudiendo ver de nuevo las partes que más interesaran de la animación.

- Mapa: Mapa de la evolución de la esclavitud en Texas (EE.UU).
- Web: <http://www.texasslaveryproject.org/maps/hb/>. [2009, Agosto].
- Fuente: Universidad de Virginia (EE.UU).

Es un mapa animado e interactivo. La animación aparece al pulsar sobre el botón de PLAY y se van modificando las diferentes regiones según los intervalos de la leyenda. Las opciones que presenta este mapa son las siguientes: I. Animación: botón PLAY para lanzar la animación, se carga la animación de la barra cronológica y la de las coropletas del mapa.

II. Interactividad: Zoom dinámico y mapa de navegación. También permite reiniciar y parar la animación con el botón PLAY / PAUSE.

III. Información adicional: en forma de gráficos.

Como se aprecia en este mapa, se combinan animaciones y elementos interactivos para ofrecer una información de forma más eficaz y cómoda al usuario final.

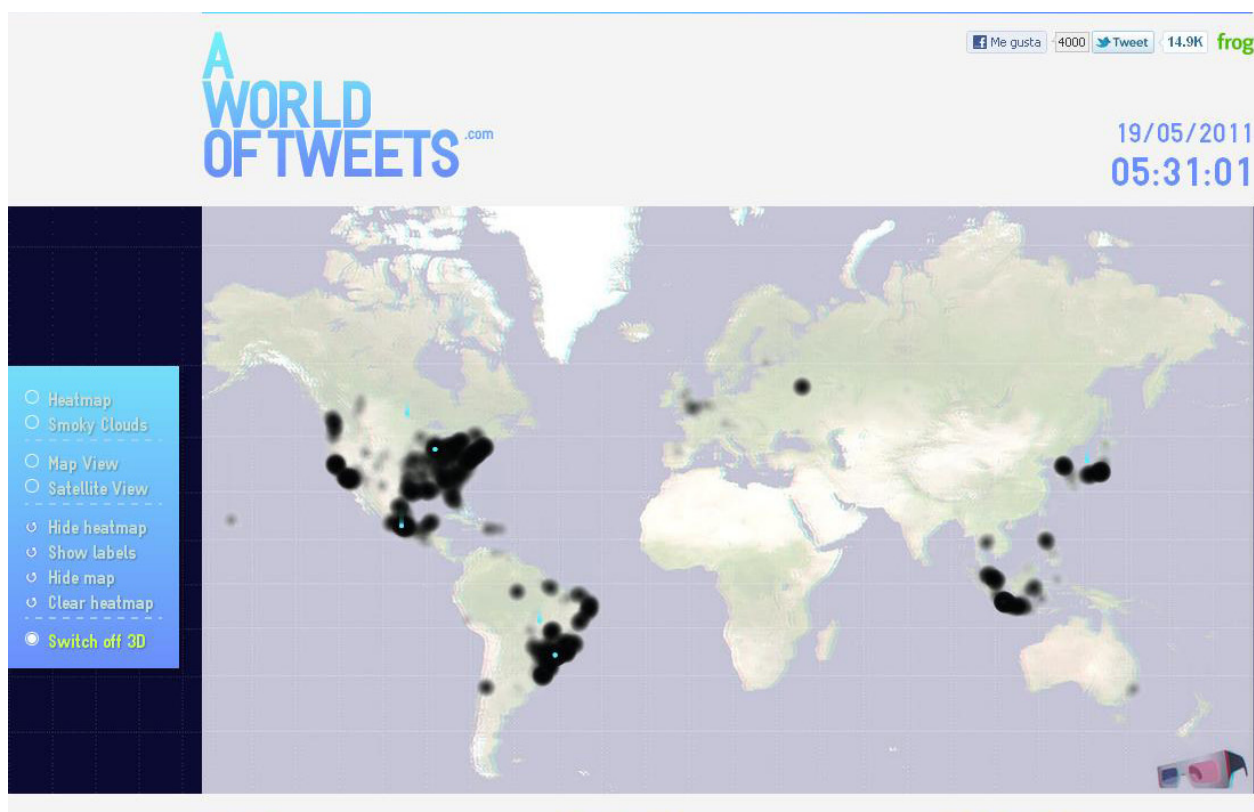
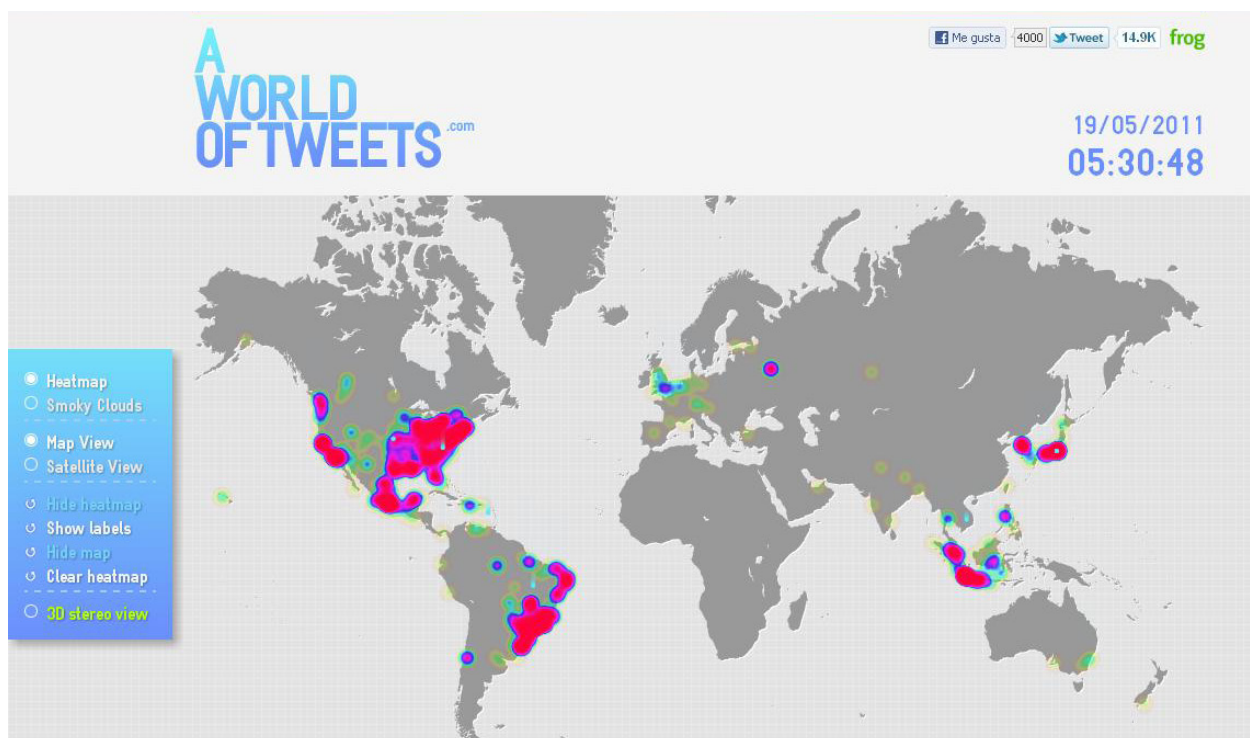


FIGURA 2.82.

FIGURA 2.83.



2.1.3.4. Visualización de información temática en 3D y en realidad virtual

La visualización tridimensional es ya una técnica de uso cotidiano. Aunque hace unos pocos años las únicas imágenes sintéticas a las que el público estaba acostumbrado eran las que aparecían en el cine o en la televisión, hoy en día, estamos habituados no sólo a ver imágenes 3D, sino a manipularlas directamente, a interactuar con ellas.

Existe un amplio abanico de aplicaciones en las que se está implantando el uso de sistemas tridimensionales interactivos, como por ejemplo los sistemas GPS, incorporados en automóviles o las últimas aplicaciones lúdicas desarrolladas para el iPhone.

Dentro del ámbito de la visualización geográfica, herramientas como Google Earth o Nasa WorldWind (Figura 2.86), menos extendido pero de código abierto, permiten al usuario representar los datos geográficos, ya sean de referencia o temáticos de que disponga.

Algunas instituciones y administraciones llevan ya tiempo haciendo uso de estas herramientas.

Este es el caso del Ministerio de Cultura, que pone a disposición pública un proyecto llamado “Catálogo Monumental de España en Google Earth”.

Tanto Google Earth como WorldWind tienen una usabilidad, escalabilidad, potencia gráfica y velocidad de carga realmente impresionantes, sin embargo, las herramientas de visualización que nos ofrecen, aunque altamente configurables, son limitadas. En un gran número de ocasiones, los proyectos de visualización de datos requieren el uso de soluciones específicas, como por ejemplo el poder representar de una manera realista la calidad de suelo, el tipo de vegetación del territorio o la búsqueda de relaciones en los datos. En estos casos, es donde el desarrollo de una aplicación de visualización “a medida” se hace imprescindible.

En el campo de la gestión urbanística es pionero en España el Ayuntamiento de San Sebastián, que publica su PGOU en Google Earth.



FIGURA 2.84
FIGURA 2.85



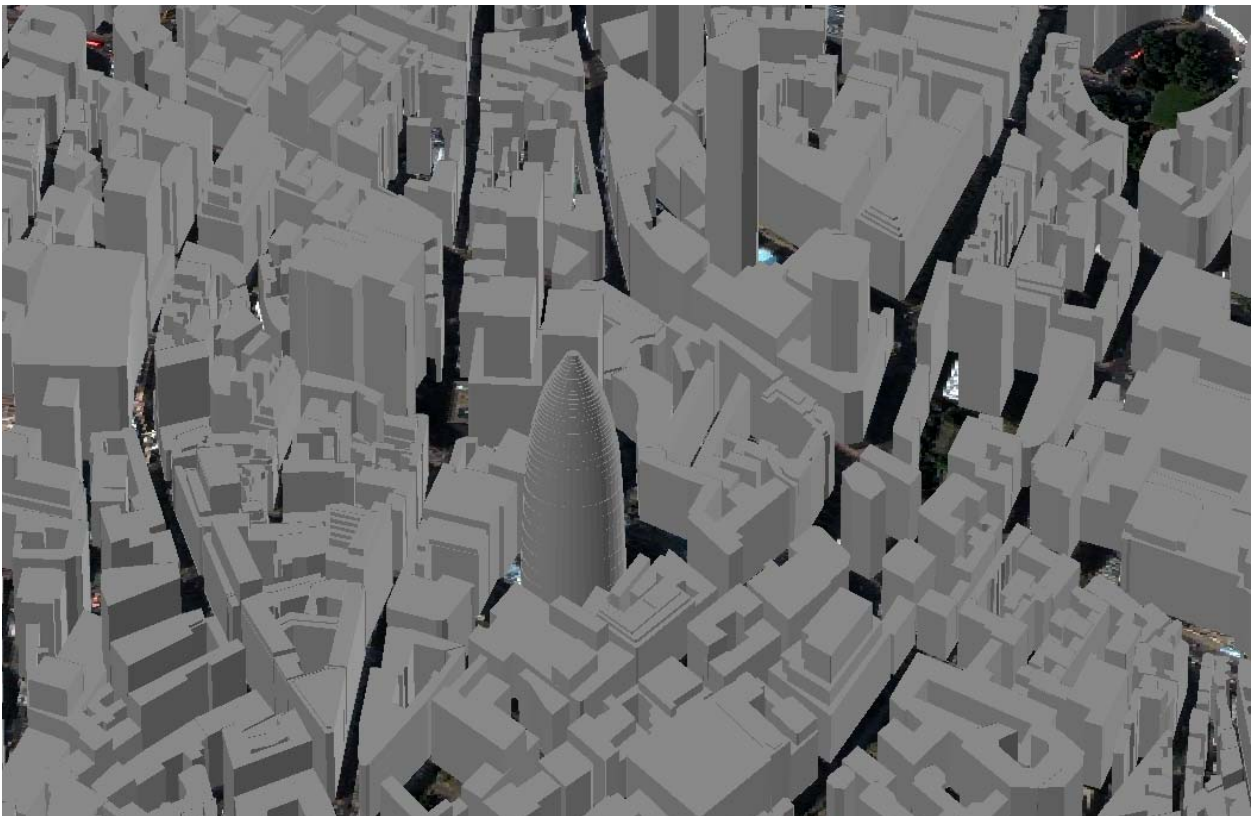
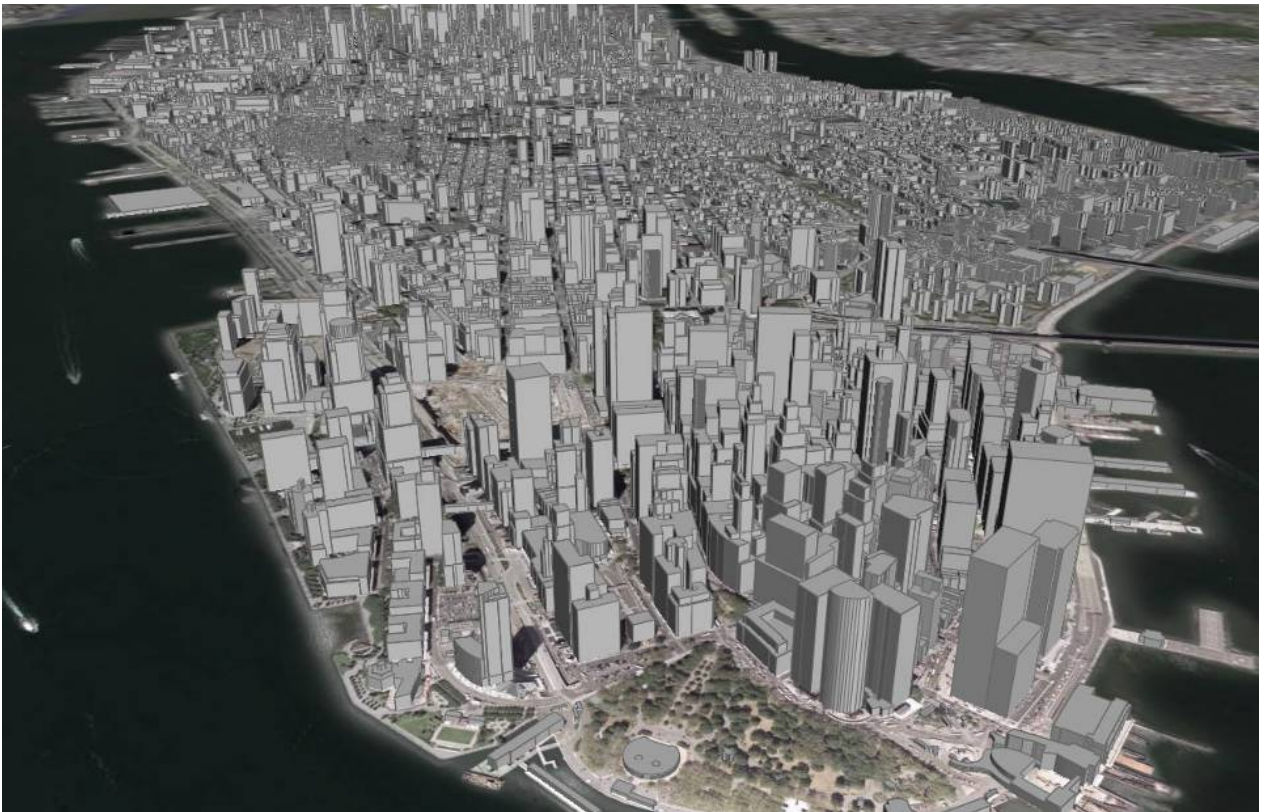


FIGURA 2.86
FIGURA 2.87



2.2. El tratamiento de la información geográfica.

2.2.1. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El término Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.) hoy está ampliamente difundido, especialmente entre los profesionales que trabajan en la planificación o en la resolución de problemas socioeconómicos y ambientales. Sin embargo, no es fácil definir lo que es un SIG. Como señalan Gutiérrez y Gould (1994) hay casi tantas definiciones como autores que escriben sobre el tema. Lo que sí que podemos señalar en una primera aproximación es que este término hace referencia a una tecnología, y esta característica queda patente en muchas de las definiciones, como la de Berry (1987):

“Sistema informático diseñado para el manejo, análisis y cartografía de información espacial”.

En sentido restringido, se identifica con frecuencia a los SIG como unos programas de ordenador, pero en realidad un SIG es mucho más que un software específico. Otras definiciones, se centran en identificar los componentes y funciones de los SIG, como por ejemplo la del NGCIA (National Center for Geographic Information and Analysis) de los EEUU:

“Un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión”. (NGCIA, 1990, vol 1);

o algunas otras, que provienen del mundo de la informática y que aportan una visión cercana a las bases de datos como la de Cebrián (1988):

“Una base de datos computerizada que contiene información espacial”.

Una de sus principales características, como queda reflejada en estas definiciones, es el hecho de trabajar con información espacial georreferenciada, que permite

integrar información de índole muy diversa (cartografía vectorial, ortofotografía, imágenes de satélite,...), de tal forma que un mismo elemento geográfico presente en distintas fuentes de información se encuentra en la misma ubicación geográfica en ambas. Un SIG descompone la realidad en distintas capas o estratos de información de la zona que se desea estudiar: el relieve, la litología, los suelos, los ríos, los asentamientos, las carreteras, los límites administrativos,... pudiendo relacionar las distintas capas entre sí, lo que concede a estos sistemas una sorprendente capacidad para el análisis espacial.

Desde hace mucho tiempo se estructura la información en mapas temáticos, según sean los aspectos del espacio que nos interese estudiar. De la misma forma un SIG descompone la realidad en distintos temas, es decir, en distintas capas o estratos de información de la zona que se desea estudiar: el relieve, la litología, los suelos, los ríos, los asentamientos, las carreteras, los límites administrativos.

En cada capa se almacena información cartográfica y alfanumérica. Existen distintas formas de almacenar esas informaciones. La más clara a efectos expositivos es aquella en la que existe un fichero con información cartográfica (el mapa digital) y otro con información alfanumérica (la base de datos asociada) (Figura 2.89). Ambos ficheros están conectados, de manera que a cada uno de los objetos espaciales del mapa digital le corresponde un registro en la base de datos.

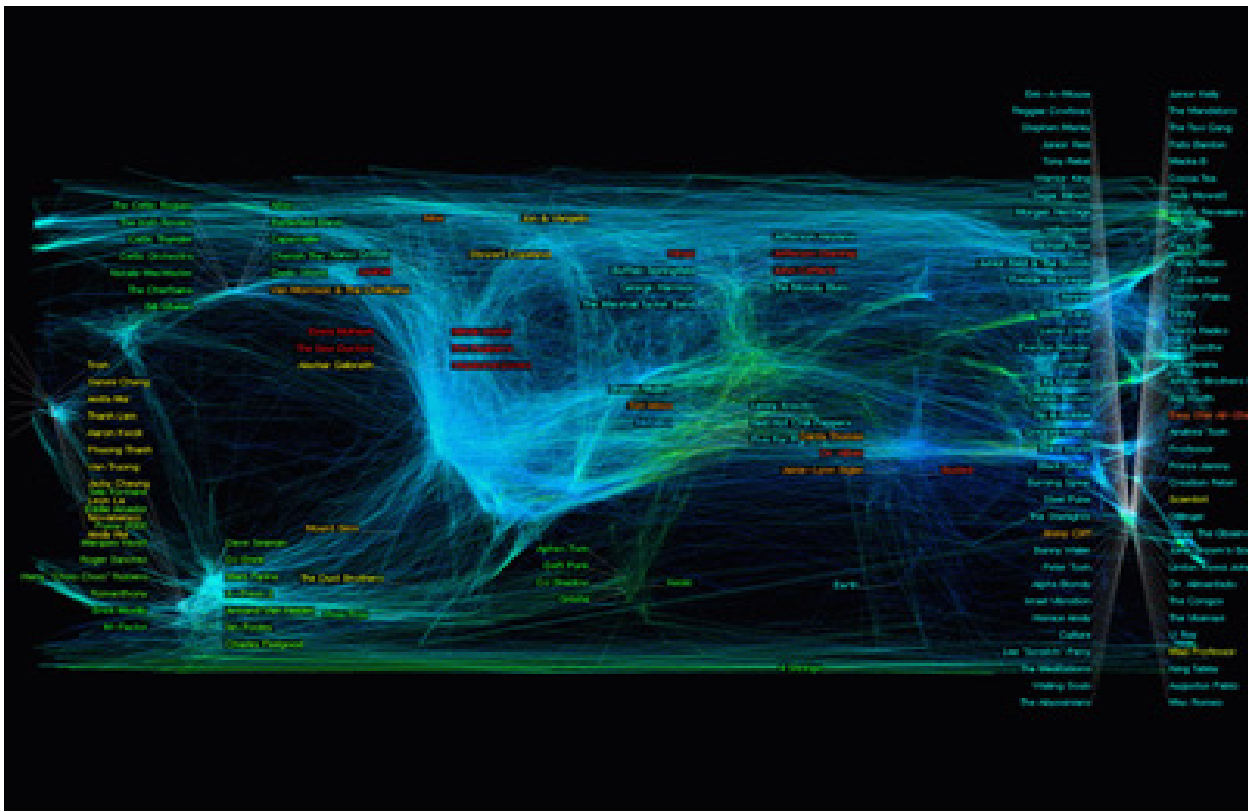
Esa conexión es posible gracias a que cada objeto del mapa digital y su correspondiente registro de la base de datos tienen un identificador común o clave. Si en el mapa digital señalamos un determinado objeto, a través de su identificador podemos conocer cuáles son los valores que registra ese elemento para los distintos atributos.

En la práctica las consultas se realizan en las dos direcciones: o bien seleccionando uno o varios objetos en el mapa digital para conocer la información que hay disponible sobre ellos en la base de datos (una consulta espacial o pregunta del tipo "qué") o bien seleccionando uno o varios registros sobre la base de datos para conocer la localización de los correspondientes objetos sobre el mapa (una consulta temática o pregunta del tipo "dónde").



FIGURA 2.88

FIGURA 2.89



Los mapas almacenados en el ordenador pueden ser objeto de operaciones muy complejas o ser combinados algebraicamente para producir mapas derivados, que representen situaciones reales o hipotéticas.

2.2.2. El análisis de la información geográfica:

Sin entrar en el análisis estadístico de la información geográfica, o análisis geoestadístico, campo sumamente interesante del que algo ya se ha tratado al hablar de técnicas de interpolación, se considera conveniente hacer mención algunas de las operaciones que realizan los SIG raster y que tienen una especial importancia para la comprensión de las metodologías y aplicaciones prácticas que después se van a presentar. Podemos distinguir entre operaciones locales, de vecindad inmediata y de vecindad extendida:

2.2.2.1. Operaciones Locales: Reclasificación y superposición

Se trata de obtener un nuevo mapa en el que el valor de cada celda depende de los datos asociados a esa celda.

En este sentido se pueden diferenciar dos posibilidades:

- Que las operaciones para generar los nuevos valores se basen en los valores existentes en una sola capa (operaciones de recodificación o reclasificación).
- Que dichas operaciones se basen en los valores existentes en varias capas, que son combinados celda a celda (operaciones de superposición de mapas).

En la práctica es muy frecuente que ambas operaciones se ejecuten sucesivamente, ya que uno de los tipos de superposición (la superposición lógica) exige partir de mapas binarios, que se obtienen previamente mediante operaciones de reclasificación.

Las operaciones de superposición de mapas y algunas de reclasificación (las de tipo aritmético) se encuadran dentro de lo que se conoce como álgebra de mapas, término que alude al hecho de que la generación de nuevos mapas se produce a partir de una ecuación que transforma los valores del mapa original o que permite la combinación de varios mapas entre sí.

Reclasificación.

Se trata de una operación local a partir de una capa o mapa fuente. Por lo tanto, a partir del valor de cada celda en el mapa fuente se obtiene el valor que corresponde a esa misma celda en el mapa resultante.

Antes de recodificar una variable debe considerarse su naturaleza, ya que algunas operaciones de reclasificación pueden no tener sentido ante determinados tipos de variables.

Existen básicamente los siguientes tipos de reclasificación:

En variables cualitativas:

- Recodificación de clases:
 - Consiste en recodificar las clases o categorías del mapa fuente una por una, asignando una nueva etiqueta solo a las clases que integren nuestro mapa. Esto además es necesario cuando el SIG soporte un número reducido de colores.
- Agregación de clases:
 - Se trata de agrupar las clases del mapa fuente y asignar nuevos códigos a las clases resultantes. El resultado puede ser una variable dicotómica, con la que se construye un mapa binario, muy útil en el análisis raster.

En variables cuantitativas:

- Agrupación de los valores en intervalos:
 - Consiste en agrupar los valores de una variable cuantitativa de acuerdo con unos intervalos previamente definidos por el usuario o calculados automáticamente por el sistema.
- Operaciones matemáticas:
 - Los valores del mapa final se obtienen a partir de los valores del mapa original, mediante una ecuación que puede incluir cualquier función matemática o trigonométrica.
 - Eliminación de decimales por truncamiento o por redondeo:

En el primer caso el número original pierde directamente la parte decimal y en el segundo se asimila al número entero más próximo, por defecto o por exceso.

Superposición de mapas

Se trata de una operación local a partir de dos o más mapas fuente: el valor de cada celda en el mapa final depende de los valores de esa misma celda en los mapas fuente.

La mayor parte de los SIG actuales permiten realizar esta operación sólo con dos capas a la vez. Pero esto no resulta un inconveniente grave, ya que se pueden superponer capa a capa progresivamente.

Los valores de los mapas fuente se pueden combinar por medio de operaciones aritméticas o utilizando condiciones lógicas, lo que da lugar a la diferenciación de dos tipos de superposición de mapas:

Superposición lógica

Se trata de encontrar las áreas donde se cumplen unas determinadas condiciones lógicas. Los mapas fuente deben ser binarios.

En la superposición lógica se utilizan las operaciones de lógica booleana: el Y (AND) lógico y el O (OR) lógico.

- Y lógico: Se trata de identificar las áreas en las que se cumplen ambas condiciones. En tal caso la operación de superposición se lleva a cabo multiplicando los valores de las dos capas celda a celda.
- lógico: Se trata de identificar las áreas donde se cumple una de las dos condiciones. La superposición se lleva a cabo sumando los valores de las dos capas, celda a celda.

Superposición aritmética

En este caso se trata de combinar dos o más capas, celda a celda, mediante una ecuación matemática: suma, resta, multiplicación, división, raíces, potencias, funciones trigonométricas, etc.

2.2.2.2. Operaciones de vecindad inmediata

Son operaciones en las que el valor de una celda en un nuevo mapa está en función de los valores de las celdas situadas en su vecindad inmediata, es decir, las celdas contiguas a ella, ya sea a través de un lado o a través de un vértice.

Filtrado de mapas:

Se trabaja generalmente con ventanas móviles de 3x3 celdas y a la celda central de cada ventana se le asigna en el nuevo mapa un valor que suele ser una media (ponderada o no) de los valores de todas las celdas de la ventana. También se pueden utilizar otras medidas de tendencia central, como la moda o la mediana.

Cuando se emplea la media ponderada los pesos

de las celdas deben sumar uno, para agilizar los cálculos.

El valor de los pesos es esencial, ya que puede producir efectos contrarios: suavizados y realces.

Suavizados:

El resultado de esta operación es un suavizado de los valores temáticos del mapa original, que tiene como objetivo destacar las tendencias generales, eliminando las variaciones locales.

El suavizado es muy intenso cuando los pesos que se otorgan a las nueve celdas son los mismos (0,11) lo que en la práctica equivale a la media aritmética.

Las operaciones de suavizado generalmente se llevan a cabo otorgando un peso mayor al valor de la celda central de la ventana (suavizado débil).

Realces:

Si en vez de resaltar tendencias generales, lo que se quiere es realzar los detalles locales, se utilizan pesos negativos en los valores de las celdas vecinas. El efecto que tiene ésta distribución de pesos es que se realzan los contrastes o se exageran las diferencias existentes en el mapa fuente entre la celda central y las celdas vecinas.

Pendientes:

A partir de una capa en la que se registra la altitud de cada celda (un MDT raster) es posible calcular automáticamente el valor de las pendientes y su orientación. El valor de la celda central de la ventana se obtiene a partir del cálculo del valor de las pendientes existentes entre esa celda y las celdas vecinas. El valor y la orientación de las pendientes son variables utilizadas en multitud de aplicaciones.

Valor de la pendiente:

Existen distintas soluciones, pero la más sencilla y usual es la siguiente: se calcula el valor de las pendientes existentes entre la celda central y sus ocho celdas vecinas, y se toma el mayor de los valores o la media aritmética. La distancia en la horizontal se mide sobre el centro de las celdas y varía según se trate de celdas contiguas por sus lados o por sus vértices (1,4 veces mayor). En el primer caso la distancia coincide con la

resolución.

Orientación:

El concepto de orientación de las pendientes se refiere al punto cardinal hacia el que éstas están inclinadas y, en consecuencia, hacia donde vierten las aguas de lluvia. De ahí que la delimitación de cuencas de drenaje se efectúe a partir de mapas de orientación de las pendientes. La orientación de las pendientes se obtiene mediante cálculos trigonométricos. El resultado es un valor en grados que indica el ángulo medido desde el norte y según el sentido de las agujas del reloj. Sobre un mapa de orientación de las pendientes es posible construir automáticamente un mapa de sombreado del relieve. Se supone que existe un foco luminoso, generalmente en el noroeste y con un ángulo de 45° sobre la horizontal. Las pendientes, según su orientación reciben los rayos de luz con mayor o menor intensidad.

Análisis de las cuencas de drenaje:

Consiste en determinar hacia qué celda de las ocho vecinas vierte el agua de lluvia que cae sobre una celda dada. Una vez terminado el proceso, el SIG puede determinar qué celdas vierten el agua de escorrentía hacia una celda o celdas concretas y delimitar así cuencas de drenaje.

2.2.2.3. Operaciones de vecindad extendida

Son operaciones en las que se relaciona una celda dada con otra u otras que ya no tienen por qué estar contiguas a ellas. Unas se basan en el cálculo de distancias, ya sean euclidianas o sobre superficies de fricción; otras están orientadas a los análisis de intervisibilidad.

Distancias euclidianas

En un sistema raster se pueden generar distintos tipos de mapas basados en las distancias entre celdas. Si se entiende por distancia la que hay en línea recta, estaremos utilizando distancias euclidianas.

Mapas de distancias euclidianas:

En un mapa raster es posible, en base a la resolución, medir la distancia euclidiana entre una celda dada y cada una de las celdas restantes. El resultado es un mapa de distancias.

Análisis de proximidad (buffer):

Se trata simplemente de conocer qué celdas se encuen-

tran a menos de una determinada distancia con respecto a una celda o zona dada. Esto puede determinarse a partir de un mapa de distancias, mediante una operación de reclasificación.

El análisis de proximidad constituye una de las operaciones más características de los SIG y es utilizada en multitud de aplicaciones: estudios de impacto ambiental, búsqueda de localizaciones óptimas, capacidad de acogida del territorio, etc.

Generación de polígonos de Thiessen:

Se generan a partir de un conjunto de puntos previamente definidos, de forma que cada celda queda asignada al punto más próximo a ella. El resultado final es una división del espacio en polígonos que recibe el nombre de teselación Voronoi.

Los polígonos de Thiessen tienen una amplia aplicación en estudios sobre áreas de influencia de centros de servicio (oficinas administrativas, bancos, bibliotecas, estaciones de metro, etc.), especialmente cuando se consideran movimientos peatonales.

También se puede recurrir a una teselación Voronoi cuando se trabaja con datos muestrales y se desconoce cuál es el valor de la variable en un punto diferente al muestral.

Superficies de fricción

Por fricción entendemos la resistencia al desplazamiento por el espacio. Las distancias euclidianas a veces resultan poco realistas, ya que el espacio no es isotrópico. Así podemos emplear el concepto de fricción de la distancia, que varía en función de distintos criterios, como el tipo de relieve, la existencia de láminas de agua, etc. Estas características pueden ser tenidas en cuenta en el cálculo de los mapas de costes de transporte y en los análisis de proximidad.

- Mapas de costes de transporte y análisis de proximidad:

En este caso se utiliza como distancia base la no euclidiana, sino la que resulta de atravesar sucesivamente celdas contiguas, por sus lados o por sus vértices.

Para tener en cuenta las características del territorio, cada paso de una celda a otra se pondera en función del valor que tienen las celdas en la superficie de fricción, aumentando el coste del desplazamiento entre cada cel-

da y la siguiente si la segunda tiene relieve accidentado, por ejemplo. Esto significa que el atravesar celdas llanas no supone coste adicional alguno, pero si la celda tiene una cierta pendiente el coste se duplica.

De esta forma se produce una distorsión en las aureolas que se generan al calcular los costes de transporte respecto a una celda o zona dada y al hacer un análisis de proximidad sobre esos datos.

Cálculo de caminos mínimos:

Sobre los datos de la superficie de fricción también es posible calcular el camino mínimo entre dos celdas o grupos de celdas.

El sistema es capaz de encontrar la ruta óptima de forma que se minimicen los costes mediante un procedimiento semejante al anterior, pero el resultado es un conjunto de celdas alineadas que marcan el camino óptimo.

Esta funcionalidad es extraordinariamente útil para el trazado de infraestructuras lineales. Así por ejemplo, el SIG puede determinar cuál es el trazado óptimo de una carretera teniendo en cuenta criterios como el uso del suelo, las pendientes, la estabilidad de las rocas, etc. De esta forma se puede elegir un trazado que, siendo respetuoso con el medio ambiente, minimice los costes de expropiación y de construcción.

Análisis de intervisibilidad

A partir de un mapa de elevaciones del terreno es posible determinar qué celdas son visibles y no visibles desde una determinada celda. El resultado es un mapa en el que se diferencian las primeras de las segundas mediante un determinado código, de forma que se delimitan cuencas visuales de forma automática.

Esta funcionalidad es de gran interés en la búsqueda de localizaciones óptimas en las que la variable visibilidad sea decisiva.

2.2.2.4. Operaciones zonales

Un grupo de celdas contiguas que presentan un mismo valor temático constituyen una zona. El sistema es capaz de reconocer las zonas como tales y de efectuar mediciones sobre ellas.

Identificación de zonas

El sistema compara las celdas contiguas para identificar las que tienen un mismo valor y en un nuevo mapa

asigna un número único a todas las celdas de cada zona, de manera que se puedan diferenciar las distintas zonas entre sí.

Evidentemente los resultados serán distintos según se considere la contigüidad exclusivamente por los lados de las celdas o por los vértices.

Una vez que las zonas están identificadas y codificadas, se puede establecer una conexión con una base de datos relacional, donde se almacenan sus atributos.

De esta forma un SIG raster se puede comportar, en lo que se refiere al almacenamiento y consulta de información temática, de forma semejante a como lo haría un SIG vectorial con una capa de polígonos.

Mediciones espaciales

Una vez que las zonas han sido identificadas y codificadas es posible realizar mediciones espaciales sobre las mismas, relativas al área, el perímetro y la forma. Los resultados de estas operaciones pueden registrarse como valores de las celdas en nuevas capas o bien almacenarse como atributos en un fichero que puede tratarse en una base de datos relacional. También pueden obtenerse salidas en forma de tablas, mostrando el valor que le corresponde a cada zona en la medición efectuada.

•Área:

La resolución permite conocer la superficie que presenta cada celda en el mundo real. Conociendo ese valor y el número de celdas de cada zona, el cálculo del área de la zona es automático.

•Perímetro:

El perímetro se determina en función del número de lados (de celdas) que forman la frontera exterior de la zona

•Forma:

Existen distintas técnicas para medir la forma de las figuras poligonales. Una de las más comunes es dividir el perímetro entre la raíz cuadrada del área. Cuanto más bajo sea el valor resultante más compacta será la zona. Para tener un punto de referencia en la valoración de los resultados es habitual dividir el ratio anterior entre 3,54 de forma que el caso de una circunferencia (la forma más compacta) se obtiene el valor 1, el mínimo posible.

2.3. Aplicaciones de los SIG en los proyectos de planificación territorial y urbana

Los campos de aplicación de los SIG son numerosos. Deberíamos diferenciar en este apartado, y en primer lugar, qué entendemos como métodos de aplicación y qué entendemos como aplicaciones.

Existe una diferencia conceptual entre aplicación como desarrollo y aplicación como campo. Esta diferencia, que explicaremos acto seguido, puede dar lugar a confusiones.

Entendemos como metodología de aplicación o aplicaciones aquellos desarrollos informáticos y metodológicos encaminados a la construcción de productos específicos para resolver un proyecto o proyectos concretos. Así por ejemplo una aplicación puede ser un programa que realice un cálculo de relaciones cruzadas y reiterativas entre entidades o cualquiera de las metodologías que se desarrollan en los próximos capítulos. También podríamos englobar en este apartado a aquellos métodos de diseño e implantación de un proyecto SIG.

También podemos entender por aplicaciones los diferentes campos de usos de los SIG. Así podríamos hablar de aplicaciones socioeconómicas, forestales, catastrales, etc. Son éstas las que a continuación se tratan.

Aplicaciones en el ámbito de la Administración Pública

Sin lugar a dudas la Administración ha sido el gran motor del desarrollo e implantación de los SIG. Ya lo veíamos en el apartado de historia y es evidente en el caso de nuestro país, donde la formación del nuevo catastro, y la adopción de esta tecnología, supuso el impulso definitivo a la implantación de estos sistemas.

Actualmente los SIG son una herramienta habitual en prácticamente todos los niveles de la Administración Pública. Desde la Administración Central hasta los Ayuntamientos pasando por Gobiernos Regionales y Diputaciones, la mayor parte de los organismos vinculados de una u otra forma con la ordenación territorial, el medio ambiente, la gestión catastral, etc., han incorporado esta tecnología. En muchos casos los resultados no han sido muy brillantes o no se han producido todavía. Esto

se debe en gran medida a la ausencia de un estudio previo del Sistema y a la escasez y falta de calidad de la información geográfica en formato digital.

Resulta incuestionable que en determinadas administraciones como las Diputaciones, con amplias responsabilidades en la ordenación y gestión del territorio, así como en la prestación de servicios de importancia prioritaria en el ámbito local y municipal, se debe disponer de un sistema de Información basado en datos espaciales y administrativos que ofrezca las herramientas necesarias para compartir, difundir y facilitar el acceso a la información. Igualmente es necesaria una serie de herramientas colaborativas que faciliten el tratamiento de dicha información. Si, además, este sistema gestiona y toma decisiones fundamentalmente sobre el ámbito local y debe interrelacionar tanto datos georreferenciados como administrativos, producidos dentro de sus servicios centrales o por organismos dependientes o fuera de su organización, dicho sistema ha de ser necesariamente complejo, altamente descentralizado en cuanto a la alimentación de sus bases de datos y con distintos niveles de acceso a los mismos.

En definitiva el Sistema de Información Geográfica Corporativo de una Diputación, debe ser una herramienta que acerque los datos y la información cartográfica de la provincia a ciudadanos e instituciones, permitiendo recoger una visión integrada del territorio de la provincia, tanto desde su estructura espacial como temática. A partir de la información recogida en las bases de datos alfanuméricas, convenientemente georeferenciadas, se constituyen en una herramienta de presentación de datos temática, temporal (evolución de las variables) y espacial adecuada para la toma de decisiones. En este sentido, una de las tareas más importantes de las Diputaciones es la posibilidad que ofrecen para visualizar y consultar la “Encuesta de Infraestructuras y Equipamientos Locales” (EIEL), gestionar dicha información de la provincia y ponerla al servicio de los ciudadanos.

El objeto de la “Encuesta de Infraestructuras y Equipamientos Locales” es la obtención de un Censo o Inventario referente a las infraestructuras y equipamientos de competencia de las Corporaciones Locales y aquéllas básicas para la comunidad que, siendo privadas o de otros Organismos, ofrecen un servicio público no restringido.

Su finalidad es conocer la situación de las infraestructuras y equipamientos de competencia municipal, formando un inventario de ámbito nacional, de carácter censal con información precisa y sistematizada de los municipios con población inferior a los 50.000 habitantes” (Artículo 4 del Real Decreto 835/2003 de 27 de junio por el que se regula la Cooperación Económica del Estado a las inversiones de las Entidades Locales).

El banco de datos de la Encuesta recoge un gran número de variables relativas a: alumbrado público, estado de la pavimentación, traídas de agua, abastecimiento autónomo de agua, características de la red de agua, características del servicio de agua, saneamiento y déficits, recogida de aguas residuales, residuos sólidos, centros asistenciales, centros de enseñanza, centros sanitarios, instalaciones deportivas, centros culturales, casas consistoriales y otros inmuebles, equipamientos recreativos (parques), protección civil, edificios públicos sin uso, lonjas, mataderos y cementerios. Su interés reside en la posibilidad de constituir la base para evaluar la eficiencia del nivel de provisión de los municipios para la planificación y priorización de necesidades de dotaciones sociales.

LocalGIS es un Sistema de Información Territorial para Entidades Locales (diputaciones, mancomunidades, ayuntamientos, etc.) que facilita realizar la gestión municipal de forma georreferenciada y ofrecer servicios de información on-line a los ciudadanos utilizando la cartografía del municipio. LocalGIS es una evolución del sistema GeoPista realizada a iniciativa del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio que cuenta con el respaldo de importantes organismos a nivel nacional, como la FEMP - Federación Española de Municipios y Provincias, el Ministerio de Administraciones Públicas, Catastro, INE – Instituto Nacional de Estadística, IGN - Instituto Geográfico Nacional, etc. Se basa en tecnologías SIG que permiten acceder y gestionar el alto volumen de datos asociado a la gestión municipal mediante una interfaz muy intuitiva: un mapa.

LocalGIS es un sistema multiplataforma, Open Source, escalable y que cumple con los estándares internacionales más relevantes relativos a la gestión de la información geográfica, como son la utilización de una base de datos compatible, servidor de mapas WMS, WFS,

formato de intercambio GML, metadatos según la norma ISO 19115, directiva europea Inspire, etc. LocalGIS cubre las necesidades de las entidades locales de disponer de un software libre de gestión cartográfica que favorece la accesibilidad rápida y efectiva a la información a un coste menor, aumentando por lo tanto la eficiencia municipal, tanto en aspectos relativos a la gestión interna como de cara a los servicios que se van a poder ofrecer a los ciudadanos.

Aplicaciones de carácter socioeconómico

Uno de los campos privados de aplicación que cuenta con mayor potencial de desarrollo es el de carácter socioeconómico. Aquí se incluyen aplicaciones del tipo de localización de servicios y negocios, análisis financieros y de mercado o gestión del patrimonio.

También se han lanzado campañas orientadas a hombres de negocios para aplicar SIG a la planificación y control de equipos de marketing. Desde hace unos años se ha puesto en boga el término Geomárketing que trata de englobar la aplicación de los SIG al estudio de mercados.

Es interesante destacar en este campo los avances en la difusión de la información estadística, básica para este tipo de aplicaciones, realizada por el Instituto de Estadística de Andalucía IEA. Merece la pena citar:

- Cartografía censal de Andalucía. Mapas temáticos por secciones. Periodo 2001-2007.
- Sistema de Indicadores de las Ciudades de Andalucía. SINCA 2007.
- Sistema de Información Multiterritorial de Andalucía. SIMA 2010.

Aplicaciones en el campo medioambiental

Otro campo tradicional y frecuente de desarrollo de aplicaciones ha sido el Medio Ambiente. En él se enmarcan proyectos de gestión de riesgos ambientales, usos del suelo (CORINE-LAND COVER), control de la contaminación (SICAH), etc. Pero sin duda, el SIG de mayor tradición en la Comunidad Autónoma Andaluza es el iniciado en los años 80 con el nombre de Sinamba (Sistema de Información Ambiental de Andalucía) y que, por su larga trayectoria temporal, ha pasado por una gran evolución tecnológica. Fruto de ella es su nueva concepción como Red Ambiental de Andalucía (Rediam) actualmente en constante ampliación.

Frecuentemente se opina que el estudio del Medio Ambiente encaja mejor en la lógica de análisis de los sistemas ráster, esto es debido en gran medida a que los primeros sistemas ambientales se desarrollaron bajo este formato y a que los estudios medioambientales suelen utilizar variables continuas que se representan mejor en esos sistemas. No obstante, hoy en día muchos sistemas combinan ambas posibilidades, potenciando los estudios medioambientales con características de ambos métodos (vectorial y ráster).

Aplicaciones en el campo de las utilities

Otro campo de aplicación con un fuerte desarrollo es el de las utilidades (traducción literal del inglés utilities). Este suele incluir aquellos apartados referidos básicamente a redes de conducción de energía (gas, agua, electricidad...). En muchos casos ha tenido un desarrollo paralelo al de la ingeniería de cada especialidad, dándose productos específicos e independientes de los SIG de propósito general. En España se están llevando a cabo desarrollos en este aspecto que serán tratados más adelante al hablar de “redes” y de su modelización.

Otros campos de aplicación

Esta división de aplicaciones no se pueden considerar como compartimentos estancos, ya que son numerosas las que se podrían enmarcar en varios de ellos a la vez, o que no estarían directamente relacionadas con ninguno. Un campo de gran auge ha sido el de la educación y la investigación, también hay aplicaciones relevantes como, la arqueología, la seguridad, los controles de navegación, los análisis electorales y un largo etcétera. En definitiva, los SIG pueden aplicarse en todas aquellas tareas y proyectos con una componente territorial, como una base de integración multidisciplinar basada en el análisis de elementos geográficos

2.3.1. La gestión de redes de infraestructuras urbanas

Una de las primeras aplicaciones en el ámbito urbano la constituyen las relacionadas con las redes. La gestión de redes de infraestructuras urbanas básicas, tales como saneamiento y distribución de agua, gas, redes eléctricas o telefónicas, más conocidas como AM/FM

(Automated Mapping and Facilities Management), se benefician claramente de las características de los SIG, ya que necesitan disponer de una cartografía muy precisa y de una base de datos asociada con la información alfanumérica de los elementos de la red. Se utilizan para análisis de mercados, trazado de nuevas líneas, localización de averías...

Actualmente la gran mayoría de las empresas de gestión de redes cuentan con un software propio, mientras que en ámbitos más académicos o de investigación se manejan aplicaciones muy especializadas que sin embargo posibilitan la importación y exportación hacia SIG comerciales más estandarizados (es el caso de InfoWorks de Wallinford Software o el simulador Epanet de la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de EEUU (USEPA)). También se desarrollan aplicaciones especializadas o extensiones para SIG comerciales como la extensión GIS-red para ArcView 3.2.

2.3.2. Aplicaciones en la Gestión Urbanística

Los instrumentos de planeamiento tienen como característica principal la de asociar “determinaciones” al territorio, o dicho de otra manera, cualquier determinación de planeamiento incluye como parte de su contenido el ámbito territorial sobre el que se aplican. Es por esto que las figuras de planeamiento urbanístico y territorial son susceptibles de estructurarse como una base de datos, y no solo eso, sino que un plan podría definirse como un conjunto de datos estructurados, interrelacionados y georreferenciados.

De las utilidades de los SIG para la información regional territorial o del planeamiento urbanístico a nivel global ya hay magníficos ejemplos en todas las Comunidades autónomas, siendo sin embargo solo algunas las que se han implicado en la tarea de homogeneizar y depurar sus bases cartográficas y parcelarias y fijar criterios a seguir para la estructuración de las bases de datos de la información urbanística municipal. Experiencias pioneras son las de los Cabildos de Tenerife y Gran Canaria y los gobiernos de Navarra y Canarias y como trabajos municipales destacar el SIG para la gestión de la ciudad de Valencia (SIGVAL) o los de los ayuntamientos de L'Hospitalet, Valladolid o Palma de Mallorca.

Como software expresamente orientado hacia esta tarea

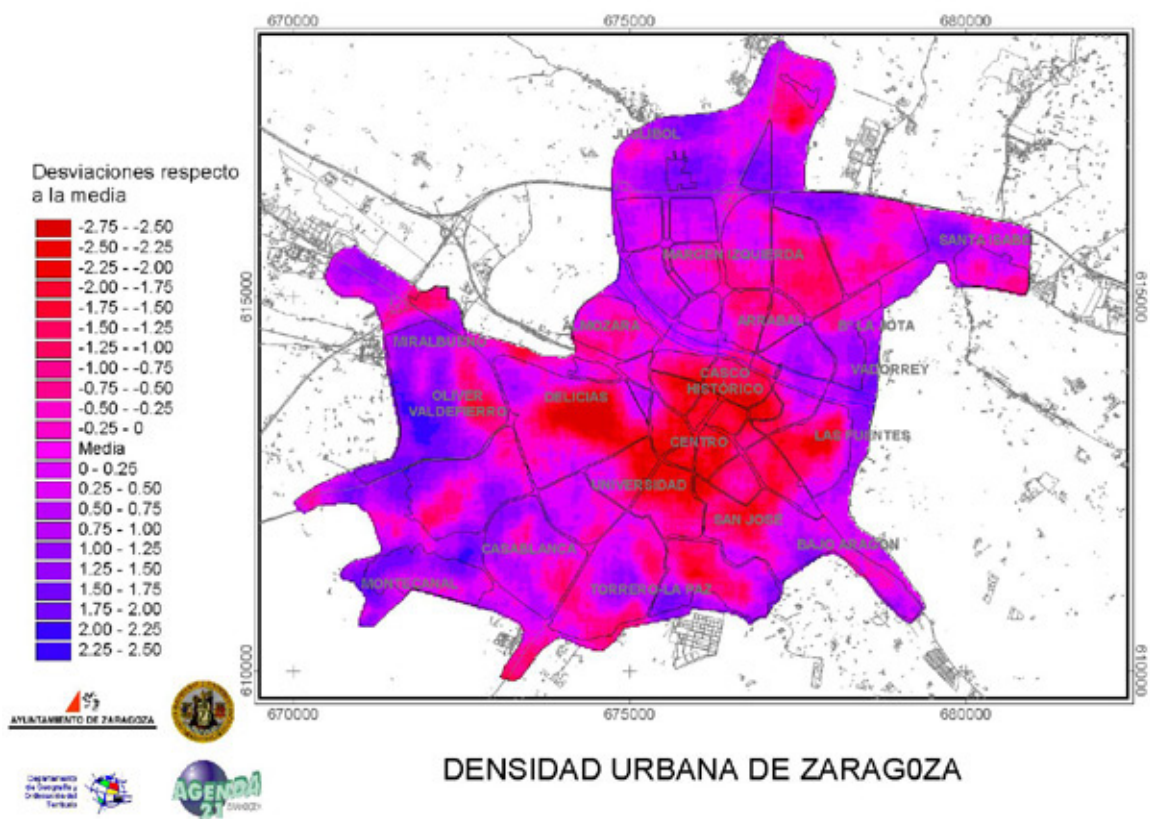
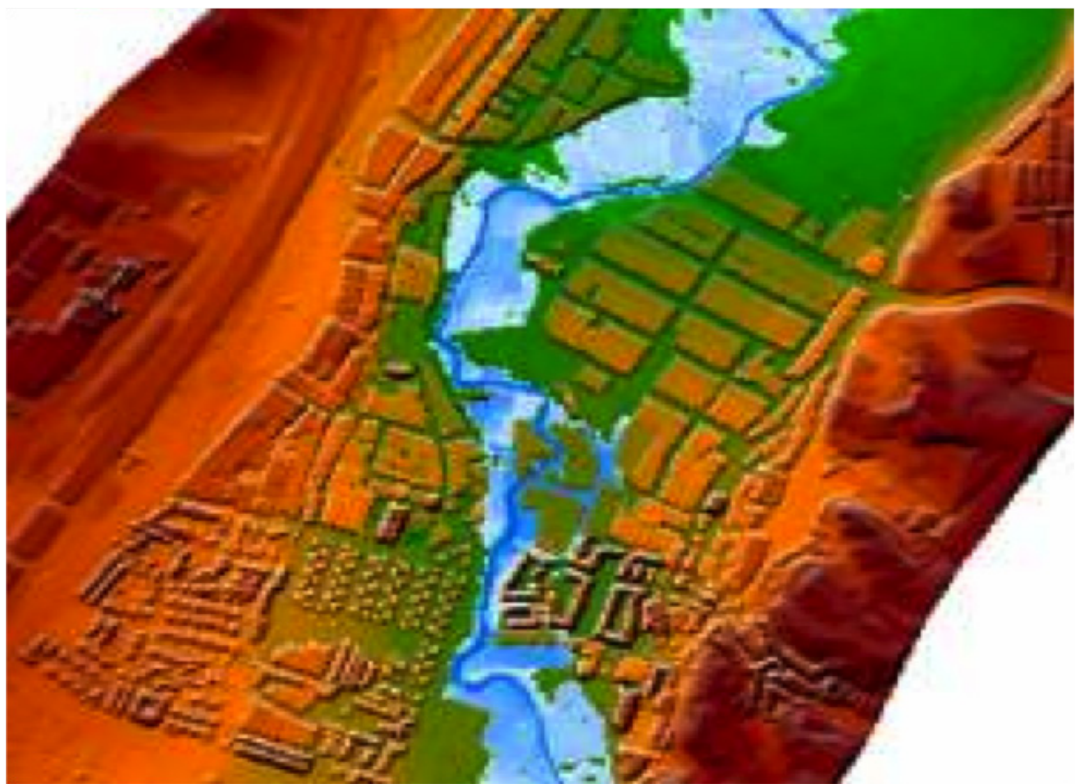


FIGURA 2.90
FIGURA 2.91



citar el programa de gestión urbanística “Hipódamos” del ministerio de Fomento. Esta aplicación, concebida e íntegramente desarrollada en la Administración pública del Estado, está basada en un SIG catastral, sobre el que se proyecta la información geométrica y las bases de datos por capas y atributos de cualquier escala de planeamiento urbanístico municipal, permitiendo su gestión y actualización continua. Además permite, en su versión 3.0, realizar simulaciones, autocalculando edificabilidades, tipologías, aprovechamientos unitarios, comprobando cada barrio, cada plan parcial, cada parcela y edificio, permitiendo ensayar los diversos escenarios posibles de planeamiento y sus efectos globales en un tiempo mínimo.

Urbanismo en Red (www.urbanismoenred.es):

La Entidad Pública Empresarial red.es, adscrita al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio a través de la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información, tiene como misión contribuir al fomento y desarrollo de las telecomunicaciones y la sociedad de la información en España. Red.es, en el ejercicio de las funciones que le han sido legalmente atribuidas en el artículo 55 de la Ley 14/2000, de 29 de diciembre (www.red.es), fomenta y desarrolla la Sociedad de la Información, de acuerdo a las iniciativas del Plan Avanza2 (www.planavanza.es). En el marco de este plan, red.es gestiona, en coordinación con otras Administraciones Públicas y Organismos Públicos estatales, autonómicos y locales, diversos programas de difusión y extensión de la Sociedad de la Información.

Una de las medidas principales incluidas en el Plan Avanza2 es la utilización de recursos públicos para la consecución de los objetivos de impulso de la Sociedad de la Información mediante programas de desarrollo e implantación de servicios electrónicos que posibiliten la prestación de Servicios Públicos Digitales a ciudadanos y empresas. En este sentido, y en ejecución de sus competencias, red.es, a partir de un Convenio de Colaboración suscrito por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, la Federación Española de Municipios y Provincias (FEMP) y la Entidad Pública Empresarial Red.es, puso en marcha el Programa Urbanismo en red en febrero de 2007, con el objetivo de impulsar la introducción de las TIC en la gestión urbanística municipal.

El Programa Urbanismo en red nació con el objeto de

publicar los planes urbanísticos municipales, a través de Internet, habilitando que los ciudadanos pudieran acceder a ellos de forma fácil y personalizada, al efecto de aumentar y potenciar la transparencia en la gestión pública del sector urbanístico. Asimismo, se perseguía facilitar una completa interoperabilidad entre las distintas administraciones y agentes implicados, a través de servicios electrónicos que permitieran la puesta a disposición de la información de planeamiento urbanístico, para ser utilizada por los diferentes interesados. La puesta en marcha de este Programa ha sentado las bases para evolucionar hacia un sistema transaccional, que permita la construcción de servicios orientados a la tramitación telemática del planeamiento urbanístico.

Se citan brevemente, como ejemplo ilustrativo, las aportaciones que desde las capacidades de los SIG se hicieron en algunas fases de la elaboración del Plan especial de protección y ordenación del centro histórico de Santa Fé en Granada.

Identificación de manzanas y estudio de la parcelación, medida y discriminación por superficies, cálculos de edificabilidad y coeficientes de ocupación máxima, proporciones calle-manzana o clasificación por alturas, fueron algunas de las tareas que se abordaron mediante consultas a la base de datos espacial, aprovechando las relaciones topológicas generadas tras la implementación de la cartografía vectorial bajo el entorno de ArcGis.

2.3.3. Los SIG en las etapas de un proyecto de planificación.

Desde que Ian McHarg publicara en 1969 su obra “Design with Nature”, hoy convertida en un clásico de la planificación urbana y territorial, las contribuciones de los SIG en este ámbito se han multiplicado exponencialmente. En esta obra se proponía una metodología de estudio del medio natural, orientada a la planificación espacial, consistente en la comprensión de sus procesos y de su carácter evolutivo y creativo mediante la superposición de variables y factores.

“Identificamos los factores críticos que afectan a la construcción de una carretera y los ordenamos de menor a mayor coste. Identificamos los valores sociales y los ordenamos de mayor a menor. Los obstáculos de la morfología del terreno, la necesidad de estructu-

ras, un terreno inestable, etc., producirán altos costes de inversión pública. De la misma manera los podemos representar. Por ejemplo, se puede hacer un mapa de factores geomorfológicos en que las zonas más oscuras representen las de mayor coste. Igualmente, se representan los valores sociales en otro mapa cuyas zonas más oscuras sean las de un valor más elevado. Si hacemos estos mapas transparentes y los superponemos, las zonas de menor coste social serán desveladas por el tono más claro.” (McHarg, 2000, pag.34)

Esta forma de proceder se ha convertido en la base metodológica de los actuales proyectos SIG.

Se entiende por planificación territorial las actividades, realizadas por cualquier agente público o privado, para establecer políticas que deben ser seguidas por la población y otros agentes económicos en cuanto al uso de los recursos naturales, la protección del medio ambiente y la localización óptima de las diferentes actividades. Dentro un proyecto de planificación o de ordenación del territorio los nuevos instrumentos de análisis geográfico pueden cumplir diferentes funciones en las distintas etapas en que se suele dividir un proceso de planificación (Arentze, Borgers y Timmerman, 1996).

- En la fase de Identificación del problema, previa a la planificación propiamente dicha, los SIG son muy útiles por su capacidad de analizar los datos geográficos que definen el problema a tratar y a resolver con la planificación territorial y ambiental. Facilitan la cartografía de los diferentes aspectos que inciden en la cuestión a conocer; permiten, mediante la superposición y otras formas de manipulación de la información, combinar datos y observar algunas de sus interrelaciones.

- La etapa de Especificación de los objetivos es fundamental en la planificación territorial. Esta tarea responde a la consideración de los criterios económicos y políticos generales y, por lo tanto, los SIG ocupan un papel secundario en esta fase. Normalmente, los SIG comerciales no disponen de capacidades para la visualización simultánea de diferentes objetivos y de las interrelaciones entre ellos, por lo que su empleo en esta tarea no es habitual. En cualquier caso, las posibilidades de visualización y cartografía siempre constituyen una ayuda para estas actividades.

- La fase de Generación de alternativas: esta actividad está basada en la combinación de los diferentes datos existentes sobre el problema y en el uso de técnicas y modelos que permitan generar diferentes soluciones a la cuestión. Los SIG están especialmente preparados para estas actividades, debido a sus capacidades para superponer y combinar estratos temáticos diferentes.

- Etapa de Evaluación de las alternativas frente a los objetivos. Una vez disponibles las diferentes soluciones al problema, resultado de la fase anterior, es necesario contrastar cada una de ellas con los objetivos establecidos en la segunda etapa. Para ello, por un lado, es necesario reunir y manejar nueva información, en lo cual un SIG puede ayudar ampliamente, y, por otro, es fundamental establecer una evaluación precisa de cómo cada alternativa obtenida cubre los objetivos pretendidos. Esta evaluación, para que sea adecuada a la complejidad de los problemas territoriales, requiere el uso de técnicas muy elaboradas, entre ellas destacan las de evaluación multicriterio (Barba-Romero y Pomerol, 1997; Barredo, 1996).

- La fase de Organización del plan. Establecimiento de un programa coherente y sistemático donde se integren las distintas alternativas seleccionadas que la puesta en práctica del plan supone. En este caso el uso de los SIG es difícil, ya que estos instrumentos no tienen capacidades para esta actividad, más adecuado resulta la utilización de procedimientos de planificación de tareas como el PERT y otros semejantes.

- Finalmente, la etapa de Control de la aplicación del plan. Si un plan de ordenación territorial quiere tener éxito, es necesario establecer mecanismos que permitan su control y el rápido establecimiento de las diferencias entre lo que realmente ocurre y lo que el plan había determinado. Para ello, nuevamente, los SIG pueden ser una interesante herramienta, dada su capacidad de comparar dos realidades espaciales, la que había imaginado el plan, y la que realmente se está produciendo, utilizando para ello las funciones de superposición y combinación de diferentes estratos temáticos.

Como vemos los SIG son útiles en bastantes momentos del proceso de planificación, por ello parece cada vez más necesario su uso en estas tareas.

2.4. El marco legal.

2.4.1. La directivas europeas INSPIRE y SEIS

INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) es una iniciativa de la Comisión Europea cuyo funcionamiento se recoge en la Directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de Marzo, y tiene como objetivo la creación de una Infraestructura de Datos Espaciales en Europa.

La Directiva establece las estrategias y los objetivos, y los estados miembros deben ajustar sus respectivas legislaciones y procedimientos administrativos nacionales.

Su propósito es hacer disponible información geográfica relevante, concertada y de calidad, de forma que se permita la formulación, implementación, monitorización y evaluación de las políticas de impacto o de dimensión territorial, de la Comunidad Europea.

Establece estándares y protocolos de tipo técnico, aspectos organizativos y de coordinación, políticas sobre la información que incluye el acceso a los datos y la creación y mantenimiento de información espacial.

Se ha desarrollado un prototipo de geoportal para soportar la Iniciativa INSPIRE que se basa en las infraestructuras de información espacial existentes en los diferentes estados miembros. (<http://eu-geoportal.jrc.it/>)

La reciente propuesta de directiva SEIS (Shared Environmental Information System), o Sistema Compartido de Información Medioambiental complementará a la directiva Inspire

2.4.2. La ley Lisige, el Instituto de Estadística y Cartografía y el plan cartográfico de Andalucía 2009-2012.

Después de la entrada en vigor de la Directiva Inspire el 15 de mayo de 2007, el 5 de Julio de 2010 se realiza su transposición a la legislación española mediante la

Ley 14/2010 sobre las Infraestructuras y los Servicios de Información Geográfica en España (LISIGE). En esta Ley 14/2010, que actualiza y complementa la Ley 7/1986 de Ordenación de la Cartografía, y la adapta a las nuevas exigencias de la UE, se hace énfasis en la utilidad que la Información Geográfica generada por las Administraciones Públicas tiene para los ciudadanos y para la sociedad en general y, en consonancia con la Ley 37/2007 de Reutilización de la Información del Sector Público, se promueve la publicación en la web de datos y servicios geográficos para hacerlos más accesibles.

Su objetivo principal es la organización de los servicios de información geográfica y de cartografía e incentivar su libre acceso.

En el Capítulo I, se define el ámbito de aplicación de la Ley, básicamente constituido por los datos geográficos ya existentes de carácter oficial. Se define además lo que se entiende por IDE, servicios de información geográfica, metadatos, interoperabilidad, Información Geográfica de Referencia, Datos Temáticos Fundamentales y Datos Temáticos Generales.

En el Capítulo II, se establecen las competencias del Consejo Superior Geográfico (CSG), como coordinador y operador de la IDEE y se le atribuye la capacidad de proponer instrucciones técnicas teniendo en cuenta las Normas de Ejecución Inspire y los requerimientos de los usuarios y las Administraciones. También se define su carácter abierto y participativo.

El Capítulo III contiene las condiciones que deben cumplir los datos y servicios geográficos que formen parte de la IDEE: se obliga a las AAPP a adoptar medidas que aseguren la puesta en común y en Internet de datos y servicios geográficos, con los límites razonables que se puedan imponer para no poner en peligro la marcha de la justicia, la seguridad pública, la acción ante emergencias, la seguridad nacional o las relaciones internacionales; se establecen plazos para que las Administraciones generen metadatos, y se impone la obligación de publicar en Internet servicios interoperables de descubrimiento (catálogos) y visualización gratuitos, con excepciones que ha de aprobar el CSG, y servicios de descarga, de transformación y de acceso a servicios.

El Capítulo IV hace referencia a la Infraestructura de

Información Geográfica de la AGE (IDEAGE) y a la obligación del IGN de crear y mantener el correspondiente geoportal. El Geoportal IDEAGE del Ministerio de Fomento agrupa y hace accesible toda la información geográfica de la AGE.

El Capítulo V recoge el necesario complemento y perfeccionamiento de la Ley 7/1986 de Ordenación de la Cartografía y se instituye el Sistema Cartográfico Nacional, ya mencionado en el Real Decreto 1545/2007, de 23 de noviembre, como marco de coordinación de la actividad cartográfica en España, y se diseñan su funcionamiento y fórmulas de organización internas.

En el marco autonómico andaluz:

El día 8 de Agosto de 2006 se publicó en el BOJA nº 154 el Decreto por el cual se ordena la actividad cartográfica de la Comunidad Autónoma de Andalucía (Decreto 141/2006, de 18 de Julio).

La Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental (GICA), que tiene como objeto la integración de toda la información sobre el medio ambiente andaluz generada por todo tipo de centros productores de información ambiental en la Comunidad Autónoma

Posteriormente, el Decreto 152/2011, de 10 de mayo, modifica el Decreto 141/2006 y una vez traspasadas las competencias en materia de cartografía e información geográfica de la Consejería de Obras Públicas y Vivienda a la de Economía, Innovación y Ciencia, crea el Instituto de Estadística y Cartografía como primer paso en la integración de los Sistemas Estadísticos y Cartográfico.

El Plan Cartográfico de Andalucía en desarrollo del Decreto 141/2006 viene a concebir la Información geográfica como un servicio público y como un instrumento al servicio de las políticas públicas y su gestión. Establece el principio de planificación para el desarrollo de las actividades cartográficas como un instrumento básico del sistema cartográfico de Andalucía, definiendo de forma sucinta un modelo basado en un Plan Cuatrienal y su desarrollo a través de Programas anuales.

2.4.3. El cambio de sistema de referencia geodésico oficial en España.

La comunidad europea mediante el programa INSPIRE promueve la armonización de la Geoinformación en toda Europa. Con este objetivo se establece la transición al nuevo sistema de referencia ETRS89 para todos los estados miembros con tal de facilitar la interoperatividad entre los territorios. El decreto 1071/2007 que oficializa el sistema ETRS89 establece la transición del anterior ED50 con tres fechas clave:

29/08/2007: Publicación del Decreto. El nuevo sistema oficial es el ETRS89 pero se puede seguir publicando en ED50 haciendo referencia al nuevo sistema.

01/01/2012: No se podrá inscribir en los registros cartográficos ningún proyecto nuevo en ED50.

01/01/2015: Publicación exclusivamente en ETRS89.

2.4.4. Las infraestructuras de datos espaciales (IDE). Servidores OGC.

Una infraestructura de información geográfica es una estructura virtual en red integrada por datos geográficos, y por lo tanto georreferenciados, y servicios interoperables de información geográfica distribuidos en diferentes sistemas de información bajo la responsabilidad y gestión de distintas instancias, del sector público o privado, que es accesible vía Internet con un mínimo de protocolos y especificaciones normalizadas, que se establecen con la finalidad de facilitar el acceso a todos esos datos y, lo que es más importante, de posibilitar el acceso encadenado a los servicios interoperables basados en la información geográfica, de forma integrada, para conseguir una información más completa y útil que cuando se maneja separadamente la de cada agente. (Ley 14/2010)

Las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDEs) nacieron por iniciativa de la administración de Bill Clinton en los Estados Unidos a mediados de la década de los noventa, exactamente en el año 1994, con la orden ejecutiva 12906 para la creación de la National Spatial Data Infrastructure de ese país, cuyo texto comienza reconociendo la importancia de la Información Geográfica:

“La Información Geográfica es crítica para promover el desarrollo económico, mejorar nuestra gestión de los recursos naturales y proteger el medio ambiente...”

En ese mismo año se fundó el Open GIS Consortium, hoy llamado Open Geospatial Consortium (OGC), consorcio sin ánimo de lucro, que agrupa a más de 300 organizaciones públicas y privadas. Su fin es la definición de estándares abiertos e interoperables dentro de los Sistemas de Información Geográfica. Persigue acuerdos entre las diferentes empresas del sector que posibiliten la interoperatividad de sus sistemas de geoprocesamiento, facilitar el intercambio de la información geográfica en beneficio de los usuarios y elaborar por consenso los documentos técnicos que definen los modelos, las interfaces y los protocolos necesarios para ello.

En el año 2002 se formula en Europa la iniciativa Inspire de la que ya se ha tratado. En ese mismo año el Consejo Superior Geográfico crea el grupo de trabajo IDE España.

La Infraestructura de Datos Espaciales de España (IDEE) tiene como objetivo el integrar a través de Internet los datos, metadatos, servicios e información de tipo geográfico que se producen en España, a nivel nacional, regional y local, facilitando a todos los usuarios potenciales la localización, identificación, selección y acceso a tales recursos, a través del geportal: www.idee.es.

Para ello se ofrecen varias aplicaciones, que incluyen un visualizador de información geográfica, que permite componer mapas superponiendo información de diferentes proveedores, un catálogo de datos y servicios, para obtener información sobre datos y servicios geográficos que se producen en España, un buscador de nombres geográficos, que facilita la localización de topónimos, y la posibilidad de descargar datos geográficos.

Entre las especificaciones más importantes del OGC destacan las de servicios:

Los llamados servicios web no son más que una manera estandarizada de acceder a aplicaciones que se encuentran en un sitio remoto usando alguno de los protocolos de Internet.

Estos servicios utilizan principalmente el lenguaje XML para codificar los datos de interés en los mensajes.

- Los Web Map Service (WMS) son servidores de mapas que pretenden fomentar el acceso del público general a la cartografía mediante el cumplimiento de los estándares potenciados por el Open Geospatial Consortium, y permiten acceder a la cartografía e imágenes georreferenciadas de una base de datos espaciales. Como resultado, este servicio generalmente devuelve al cliente usuario una imagen ráster (jpg, png, etc.) que puede después ser usada dentro de otra aplicación.
- El protocolo Web Feature Service (WFS) hace posible acceder a través de internet a los datos geográficos no solo a efectos de visualización en un mapa, sino además para consulta y descargas.
- El Catalogue Service Web (CSW), el Web coverage service (WCS) y el Open Location Services (OLS), completan esta oferta.
- El OGC está trabajando en el estándar WTS (Web Terrain Server) cuyo objetivo es producir vistas en perspectiva de un área determinada geográficamente. La idea es generar en el servidor remoto la imagen 3D de la escena que el cliente está viendo.
- Y para terminar, comentar brevemente que la OGC ha lanzado recientemente un nuevo estándar llamado W3DS (Web 3D Service). La principal diferencia con el anterior es que el renderizado se realiza en el cliente, liberando así al servidor de la carga, y agilizando la transferencia de datos.

El Decreto 141/2006, desarrolla un capítulo específico para la Infraestructura de Datos Espaciales, en el cual se le asignan objetivos, contenidos, alcance, etc..

La IDE de Andalucía forma parte de una red de infraestructuras de datos espaciales con nodos a nivel autonómico, estatal y europeo, que integran geoservicios interoperables mediante estándares internacionales, implantados en el desarrollo de la Directiva Inspire.

CAPITULO 3

Cartografías de procesos y flujos.....83

3.1. Introducción.

3.2. La Modelización hidrológica en la planificación municipal.

3.2.1. Modelos Unidimensionales

3.2.2. Modelos Bidimensionales

3.2.3. Modelos hidrológico-hidráulicos y Sistemas de Información Geográfica.

3.2.4. Mapas de peligrosidad y riesgo de inundación en la planificación territorial y urbanística.

3.2.4.1. El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI) y los mapas de riesgo de inundación en el planeamiento municipal.

3.2.4.2. Avances en la gestión del riesgo de inundación

3.2.4.3. Ejemplo de Aplicación.

3.2.5. Cartografías temáticas en la gestión integrada de cuencas hidrográficas.

3.2.5.1. Caracterización territorial en la cuenca del Guadalfeo

3.2.5.2. Propuesta de ámbitos para la coordinación hidrológico-territorial en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir.

3.2.5.3. Transformación territorial y paisajes del agua en la cuenca del Segura.

3.3. El Análisis de redes y la planificación del transporte

3.3.1. Análisis de redes. Rutas óptimas.

3.3.2. Polígonos de Thiessen y áreas de influencia.

3.3.3. La modelización de las redes. (Network analyst)

3.3.4. La modelización en la planificación del transporte

3.3.4.1. Los planes de movilidad urbana sostenible.

3.3.4.1.1. Análisis de la Oferta de transporte.

3.3.4.1.2. Análisis de la Demanda de transporte.

3.3.4.1.3. Modelos de Demanda de transporte.

3.3.4.1.4. Comparación de la Oferta y la Demanda de transporte.

3.3.4.2. La modelización de la accesibilidad territorial.

3.3.4.2.1. Generación de la Superficie de fricción

3.3.4.2.2. El algoritmo Costo-Distancia

3.3.4.2.3. La elección del objetivo. Indicadores de accesibilidad.

3.3.4.2.4. Los Gradientes de accesibilidad.

3.4. El impacto territorial de las nuevas infraestructuras viarias. Aplicaciones prácticas.

3.5. Conclusiones

3 CARTOGRAFÍAS DE PROCESOS Y FLUJOS.

3.1. introducción.

La Real Academia Española define *proceso* como “*el conjunto de las fases sucesivas de un fenómeno natural o de una operación artificial*” y también como “*transcurso del tiempo*”, mientras que denomina *flujo* a la acción y efecto de fluir, correr de un líquido o un gas, brotar con facilidad de la mente o de la boca....

Este capítulo cuya denominación “cartografías de procesos y flujos” hace referencia directa al título de la tesis, aborda el reto de representar este transcurso del tiempo, el fluir de ciertos elementos (agua, vehículos...), que en capítulos posteriores se irá desarrollando, convirtiéndose en imágenes de la aptitud del territorio ante la implantación de una actividad, en reproducciones de las dinámicas territoriales observadas o en dibujos de la energía de una ciudad a lo largo de toda una jornada.

La denominación “mapas de flujo” de la cartografía tradicional, también llamados mapas dinámicos, son aquellos que reflejan movimientos lineales, generalmente mediante flechas, para representar, por ejemplo, corrientes marinas, rutas de aeronavegación, migratorias o de transporte. Los mapas de densidad de tráfico, donde el grosor de la línea es proporcional al número de vehículos que pasan en una unidad de tiempo por una cierta vía (Figura. 3.1), son muestras de mapas de flujo de tipo cuantitativo. Estos se pueden clasificar en tres tipos (Dent, 1999): radiales, de red o de distribución (Figura. 3.2).

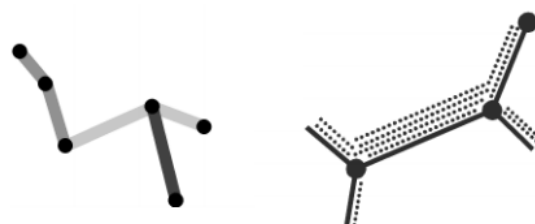
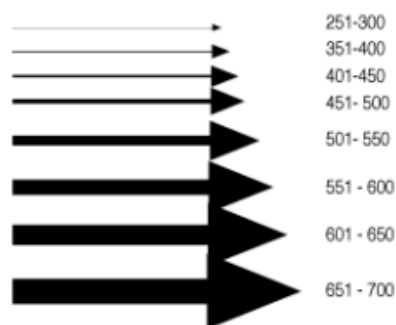
FIGURA 3.1. Representación de flujos mediante flechas.

FIGURA 3.2. Tipos de mapas de flujo.

FIGURA 3.3. Simbología mediante graduación de tonos y anchos.

Los primeros se distinguen por su aspecto radial, pues las características cartografiadas toman formas nodales. Los de red se utilizan con el propósito de representar la interconectividad entre distintos puntos, y los de distribución suelen reflejar flujos comerciales, de distribución de mercancías o de migraciones. La cantidad de flujo es simbolizada mediante líneas de anchos proporcionales, mediante distintos valores de un mismo tono de color o mediante la repetición de elementos puntuales o lineales que representan cantidades fijas de flujo. En este último caso se perciben las diferencias de volumen sin pisar otras informaciones del mapa (Figura 3.3).

Los planos de rutas de las líneas de transporte público, por ejemplo, representan la red viaria con mayor grosor en función al número de líneas disponibles (Figura 3.4).



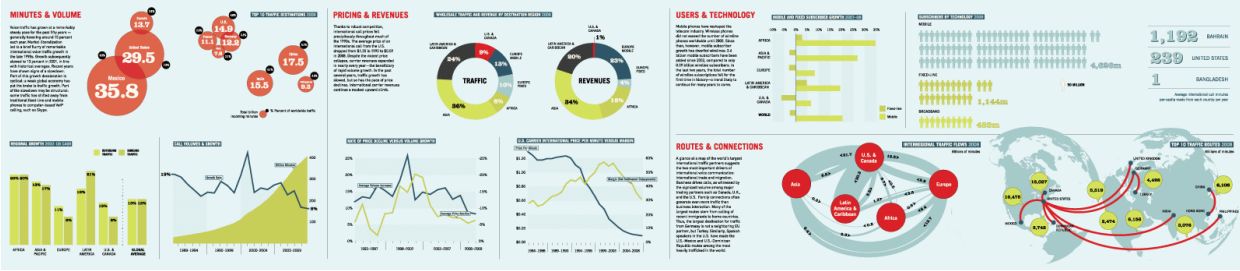
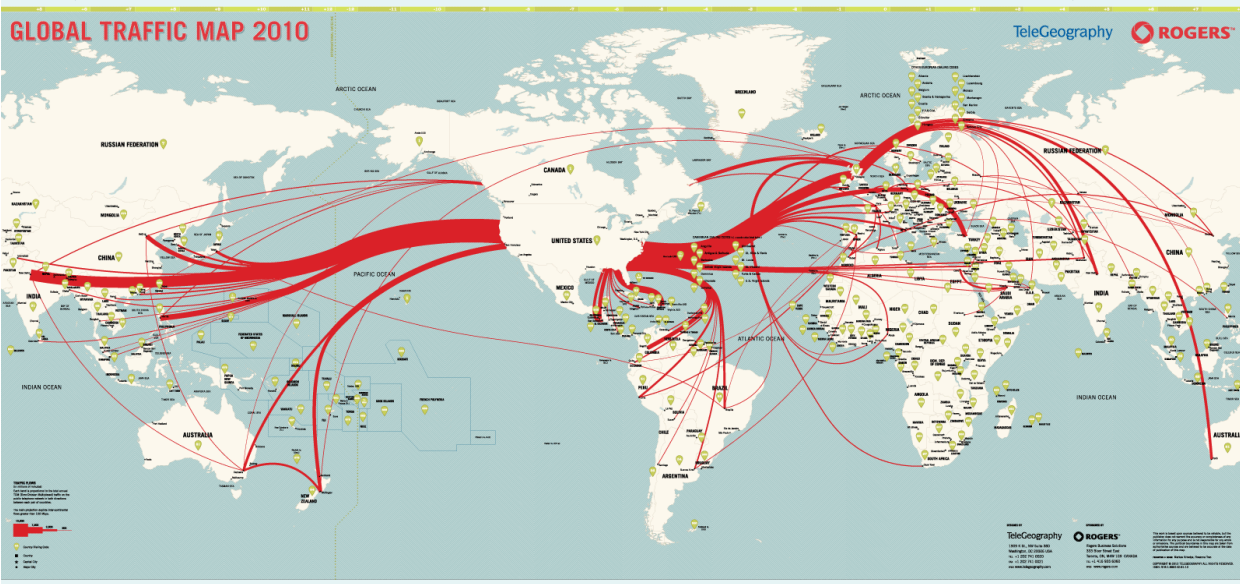
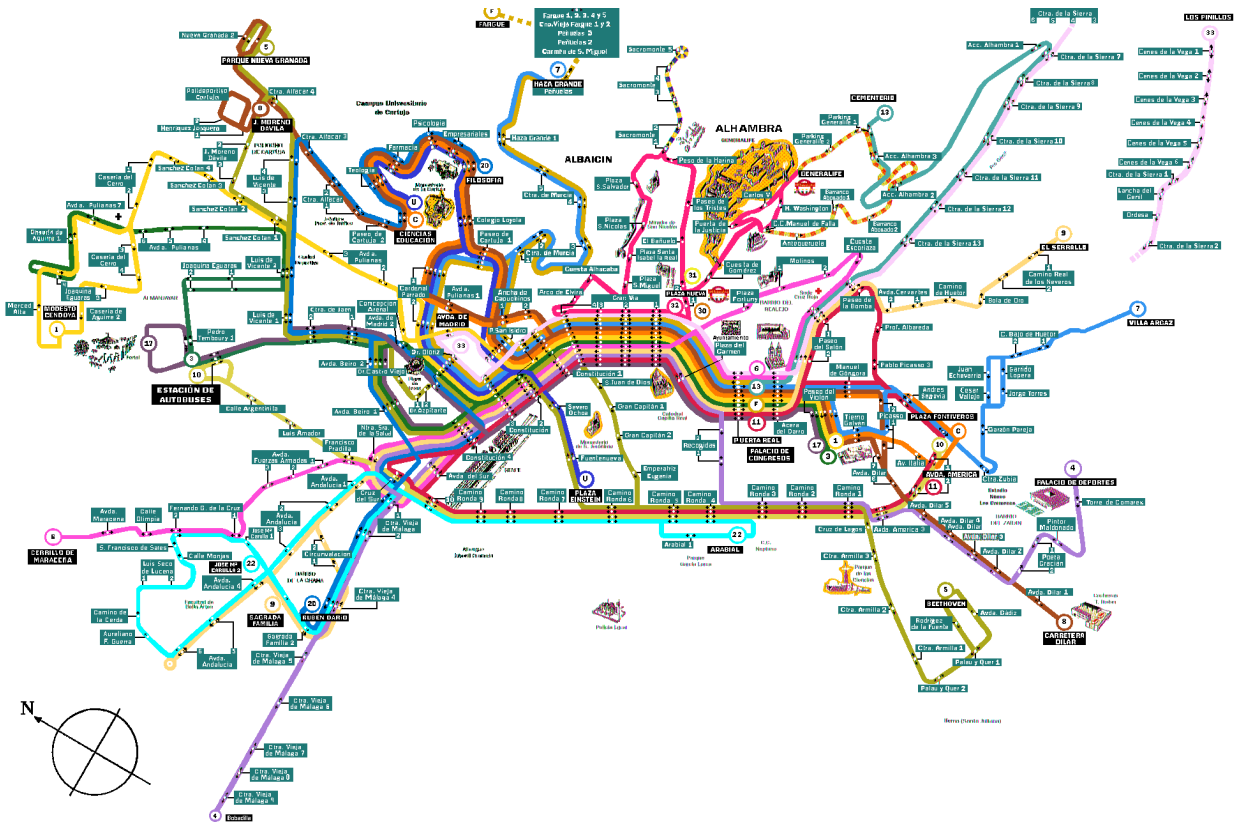
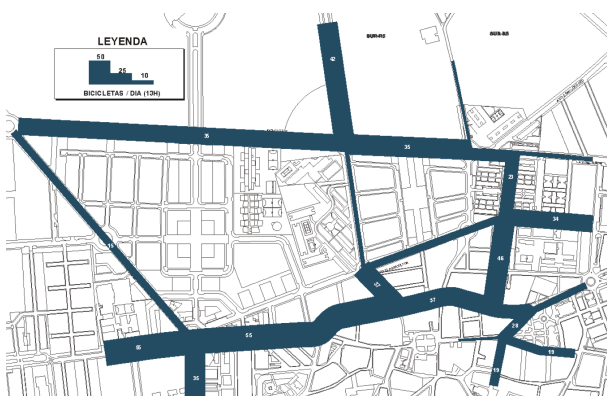
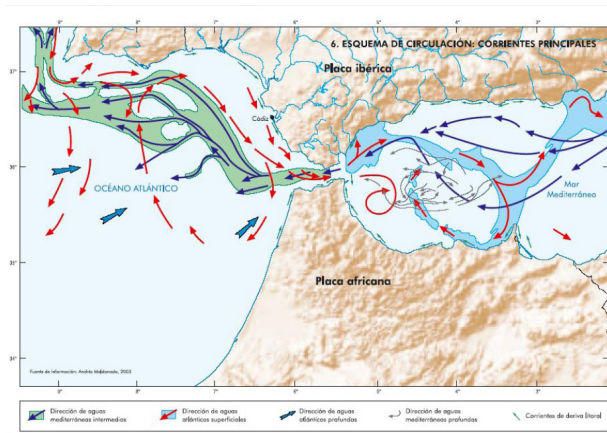


FIGURA 3.4. Plano de líneas de transporte público en granada.

FIGURAS 3.5. a 3.8. Varias meuestras de mapas de flujo tradicionales.



Otros ejemplos de estas cartografías se muestran en las figuras 5 a 8.

La generación de las cartografías de procesos y flujos que ahora se presentan tiene otra naturaleza bastante distinta. No supone solamente el diseño de una simbología adecuada y del correcto manejo de las variables visuales tratadas en el capítulo anterior, sino que además necesitan para su creación de la mediación de un conocimiento (una teorías, unos métodos, una experiencia), específico de una práctica profesional, de unas metodologías que aunque no son el objetivo principal de esta tesis, sí que resultan necesarias para la lectura correcta del resultado final. Se intentarán exponer aquí de la forma más clara posible.

El interés de estas representaciones en el ámbito de la planificación es evidente y a lo largo de los próximos capítulos se manifestará de forma clara.

Las cartografías de riesgo de inundación, resultantes de los estudios hidrológico-hidráulicos realizados en los cauces afectados por el planeamiento municipal (PGOUs), las generadas en un ámbito más amplio para la gestión integrada de cuencas hidrográficas, las realizadas en la modelización del tráfico en los Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) o las que representan la variación de la accesibilidad en los territorios afectados por una nueva infraestructura viaria serán muestras de ello.

3.2. La modelización hidrológico-hidráulica en la planificación territorial y urbanística.

La modelización matemática del flujo de agua en un río consiste básicamente en conocer los valores que toman las variables hidráulicas (calado, velocidades, caudales, etc.) a partir de la resolución por métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis (Bladé, 2006). Una vez conocidas estas variables mediante una serie de cortes transversales a lo largo del eje del río será posible la delineación de la superficie ocupada sobre un modelo digital de elevaciones.

En un primer paso, para la modelización de la propagación de avenidas en ríos, se deberían resolver las ecuaciones del flujo variable del agua en lámina libre o ecuaciones completas de Saint Venant. Se trata de un

sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, hiperbólico y cuasi-lineal, deducido por Barré de Saint Venant en 1871, y que no tienen solución analítica para geometrías reales. Para un fluido incompresible e isótropo, como es el agua, se obtienen las de Navier-Stokes, que particularizadas para describir las variables promediadas en un pequeño incremento de tiempo finalmente se concretan en las ecuaciones de Reynolds (Bladé et al. 2006). Su resolución exigiría una discretización tridimensional del dominio de estudio y el esquema numérico sería complejo y muy costoso computacionalmente. Frecuentemente el flujo de agua en cauces naturales presenta unas características que permiten simplificar estas ecuaciones más generales y obtener resultados suficientemente precisos.

3.2.1. Modelos Unidimensionales:

Para el estudio de los efectos de la propagación de avenidas en ríos, y en concreto para la obtención de velocidades y cota del agua, se han usado en el pasado y se siguen usando mayoritariamente en la actualidad, modelos unidimensionales en **régimen permanente gradualmente variable** y fondo fijo. Estos modelos, los más extensamente utilizados por su sencillez y amplia difusión, pueden ser una herramienta suficiente para estudios donde la evolución temporal no sea un factor a tener en cuenta y el flujo sea eminentemente unidimensional. Se basan en esquemas numéricos relativamente simples pero eficaces (ecuación de la conservación de la energía, ecuación de Manning, ecuación de la cantidad de movimiento), que pueden considerar cambios de régimen, cauces con geometrías complejas y con llanuras de inundación y singularidades tales como azudes, puentes, pasos bajo vía, etc... (Bladé, 2006).

El modelo HEC-RAS.

Este modelo numérico (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) del cuerpo de Ingenieros del ejército de los EEUU, de uso libre y en continuo desarrollo, usado en el ámbito de la ingeniería hidráulica y fluvial y con una gran aceptación por parte de la administración pública, ha sido desarrollado para simular flujos tanto en canales artificiales como naturales (Bladé et al. 2009).

Posee cómodas interfaces gráficas para representar la geometría y ver los resultados, comparando distintas

hipótesis de funcionamiento, y realizar informes, pero no deja de ser una aproximación al flujo de lámina libre, con limitaciones de cálculo inherentes a las hipótesis de partida de las ecuaciones que resuelve. Básica es la hipótesis de **flujo unidimensional**, al reducir la formulación general del movimiento (tridimensional) a un movimiento en una sola dirección, considerando despreciables las otras dos. Así, cuando el movimiento que se desea simular tiene componentes relevantes en más de una dimensión, los resultados del modelo serán muy simplificados y, en muchos casos, erróneos. Otra limitación es la de la pendiente del cauce del río o solera del canal que debe ser a lo sumo de un 10%.

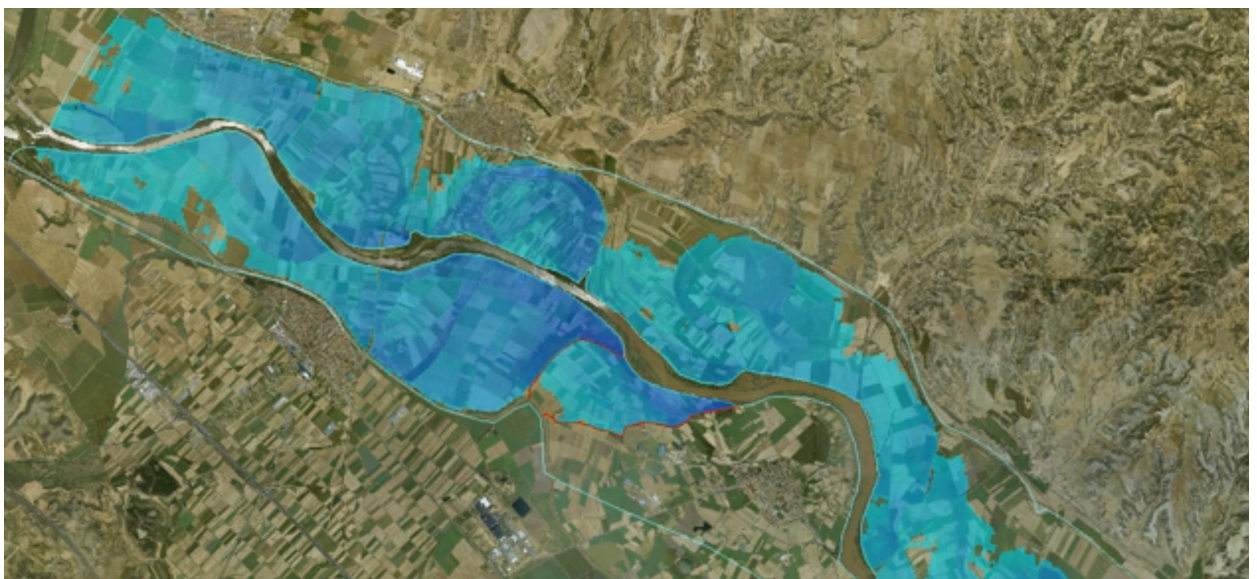
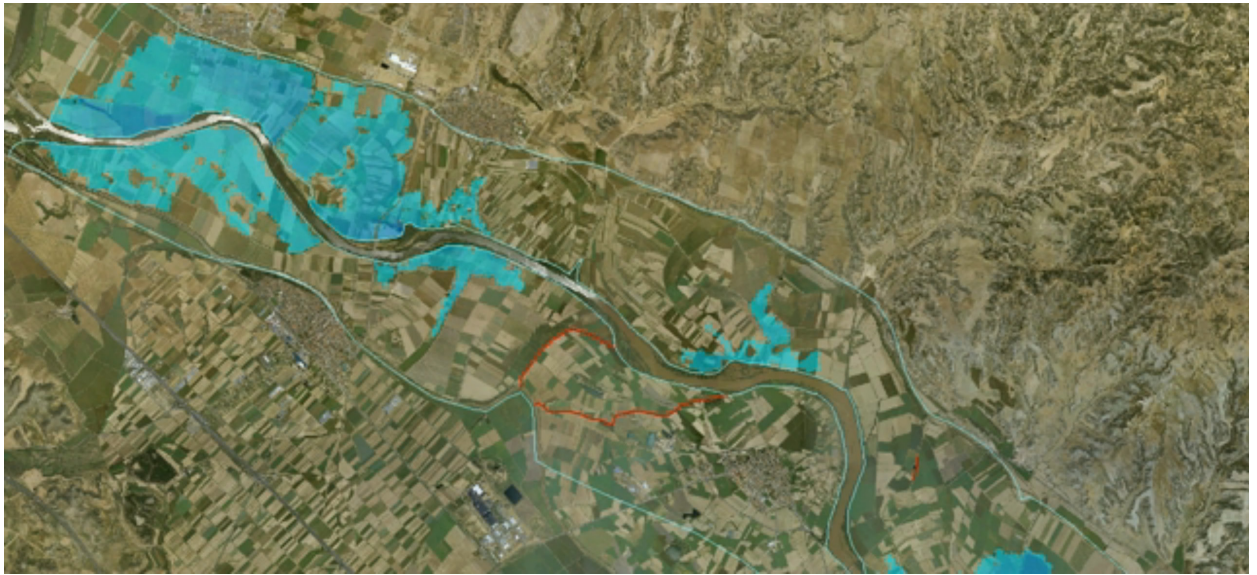
El modelo es aplicable tanto para movimientos estacionarios (régimen permanente) como transitorios (régimen variable). El modelo estacionario resuelve la ecuación de conservación de la energía, o trinomio de Bernoulli, de forma iterativa (método paso a paso) utilizando de forma auxiliar la conservación de la cantidad de movimiento. De esta forma el modelo permite el cálculo simplificado de flujos en saltos hidráulicos, hidráulica de puentes y alcantarillas, encauzamientos, confluencias, y demás flujos locales rápidamente variados.

Los manuales de uso del programa, de fundamentos hidráulicos y de aplicaciones prácticas, así como el propio software, en su versión 4.1, pueden obtenerse gratuita y directamente desde el enlace: www.hec.usace.army.mil (Figura 3.10).

Otros modelos comerciales de simulación unidimensional ampliamente utilizados y que pueden resultar una alternativa o complemento al modelo HEC-RAS son el Watershed Modelling System (WMS), actualmente en su versión 6.1., o el software RiverCad, entorno gráfico basado en un sistema tipo CAD con conexiones a HEC-RAS.

En el caso de que el proceso a estudiar sea claramente **no permanente** se debe recurrir a la resolución de las ecuaciones unidimensionales del régimen gradualmente variable o ecuaciones de Saint Venant unidimensionales. Los esquemas numéricos clásicos son: el **método**

FIGURA 3.9. Cartografías de la evolución del proceso de inundación.



de las características, que podría servir para canales prismáticos pero no es adecuado para cauces fluviales, los **métodos en diferencias finitas** (implícitas como el de Preissmann o de los 4 puntos, o explícitas como el de McCormack), y por último los **métodos de elementos finitos** que necesitan un elevado consumo de tiempo de cálculo y no aportan ventajas considerables respecto al anterior.

HEC-RAS dispone actualmente también de un módulo de simulación para este caso (modelo UNET en diferencias finitas implícitas), que ha ido ganando en robustez y versatilidad de cálculo (Bladé et al. 2009).

Otros modelos comerciales unidimensionales que resuelven estas ecuaciones para un régimen no permanente son el MIKE11 del Instituto de Hidráulica de Dinamarca (DHI), el modelo SOBEK, de Delf Hydraulics y el DAMBRK de BOSS International.

3.2.2. Modelos Bidimensionales:

La necesidad de estudiar fenómenos naturales más complejos, como pueden ser la inundación de una gran llanura, la confluencia de dos cauces, el cruce de dos corrientes de agua o el flujo en un cauce ancho e irregular, donde la hipótesis de unidimensionalidad se aleja demasiado de la realidad, conduce al desarrollo de los esquemas bidimensionales.

Los esquemas cuasi-dimensionales, donde se aplicaban las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales y una serie de células de almacenaje, fueron los primeros intentos de modelar la inundación de una zona llana a partir de desbordamientos de cauces principales, debido a la poca capacidad y baja velocidad de los antiguos ordenadores que no permitían la resolución bidimensional. Los modelos MIKE 11, HEC-RAS y GISPLANA incorporan esta aproximación cuasi-dimensional.

Como en el caso unidimensional, para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones se suelen utilizar los tres métodos antes citados, pero adicionalmente se cuenta con la técnica de discretización en volúmenes finitos, menos compleja, de menor coste computacional y más adecuada para el desarrollo de esquemas bidimensionales de alta resolución. Una extensa explicación de estos modelos que se basan en la des-

composición del dominio físico en polígonos, volúmenes de control o volúmenes finitos, se puede encontrar en Bladé et al. 2009.

En el campo de la hidráulica y la ingeniería fluvial estos esquemas se han desarrollado desde principios de los 90, pero solo recientemente se han conseguido buenos resultados con geometrías reales complejas e irregulares. Un sistema de modelización que tiene una cómoda interfaz y es compatible con los sistemas GIS es el modelo IBER.

El modelo IBER, es el resultado de la fusión del modelo CARPA, Cálculo en Alta Resolución de Propagación de Avenidas, y del modelo Turbillón (Cea, 2005). El primero es una herramienta de cálculo numérico del flujo de agua en lámina libre y régimen variable desarrollado en el grupo de investigación FLUMEN de la E. T. S. de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (Universitat Politècnica de Catalunya), y el segundo, diseñado para la simulación de flujo turbulento en lámina libre y régimen no permanente, desarrollado en el GEAMA (Grupo de Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente) de la Universidad de La Coruña.

IBER tiene, por tanto, las capacidades de ambos y un ámbito de aplicación extenso: hidrodinámica fluvial, simulación de rotura de presas, evaluación de zonas inundables, cálculo de transporte de sedimentos.... Como su antecesor resuelve las ecuaciones de Saint Venant en 2D, con esquemas numéricos explícitos basados en la técnica de los volúmenes finitos, dadas unas condiciones iniciales, unas condiciones de contorno, una rugosidad y unos parámetros de cálculo.

Destacan en este apartado también los modelos MIKE 21 (Figura 3.11), que junto al MIKE 11 forman el nuevo MIKE FLOOD (DHI), o el SOBEK de Delf Hydraulics.

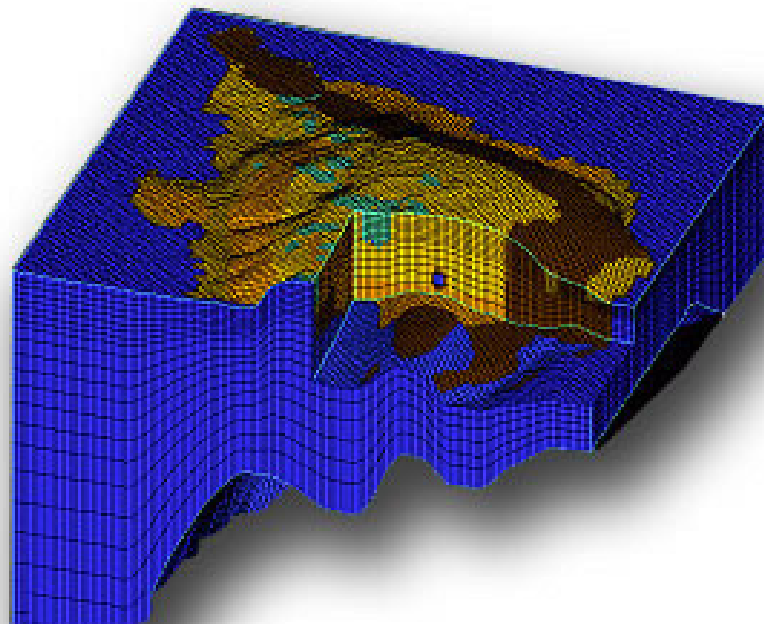
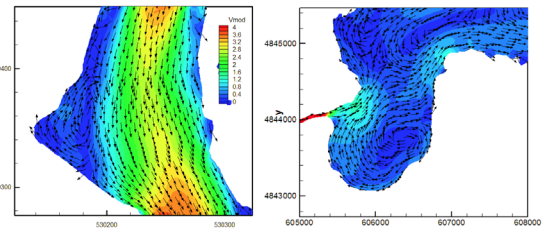
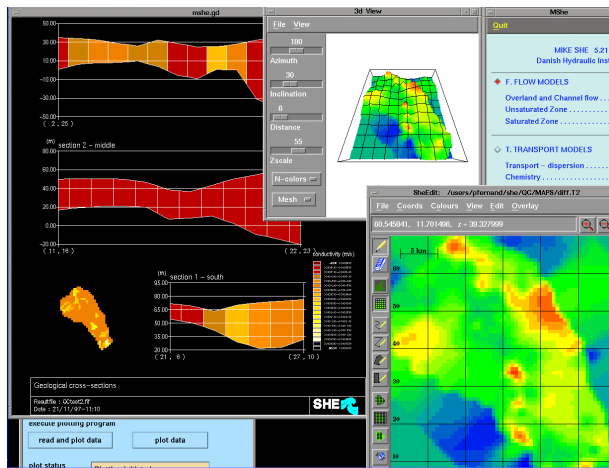
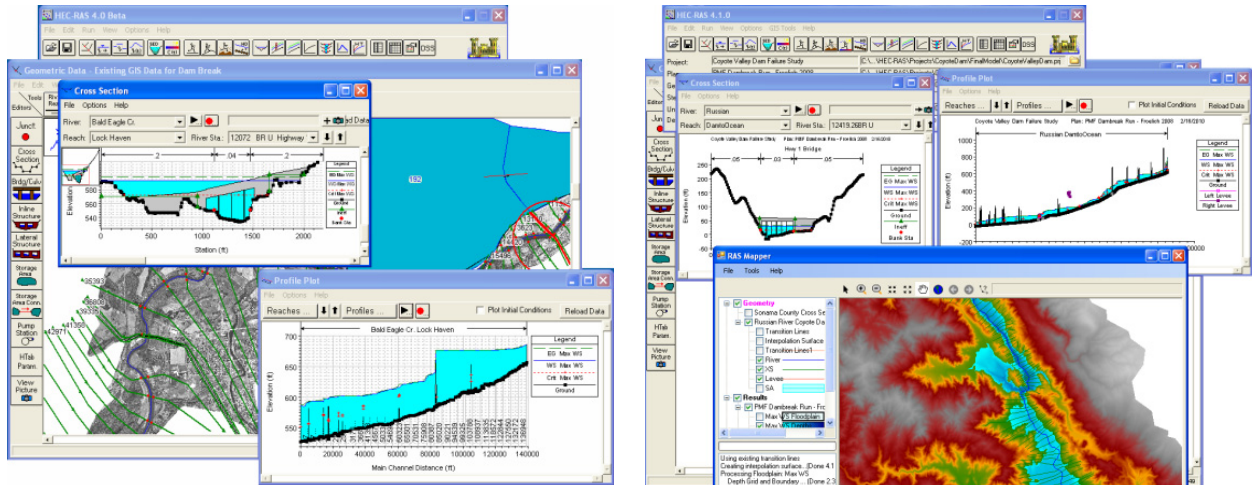
Otros modelos son el BOSS SMS, de BOSS International Inc., el modelo ISIS Profesional, de Halcrow Engineering

FIGURA 3.10. Imágenes del Modelo HecRas

FIGURA 3.11. Imagen del Modelo MIKE SHE

FIGURA 3.12. Detalle de Flujo Bidimensional

FIGURA 3.13. Imagen del Modelo Modflow para la modelización de aguas subterráneas



(basado en el ISIS Steady de HR Wallingford), el modelo español GUAD2D de la ingeniería INCLAM o la última versión de Infoworks Suite de la Universidad de Wallingford.

Para la modelización de aguas subterráneas, ya en el campo de la hidrogeología, se utilizan modelos comerciales 3D como Modflow o GMS, de GSM/WMS/SMS Group (Figura 3.13).

3.2.3. Modelos hidrológico-hidráulicos y Sistemas de Información geográfica.

Aunque los Sistemas de Información Geográfica no son, en principio, instrumentos diseñados para la simulación mediante modelos matemáticos, ya que no se prestan con facilidad a estudios dinámicos al no disponer de representación explícita de la variable tiempo (ecuaciones diferenciales que gobiernan los problemas de flujos), sin embargo son herramientas que facilitan el pre y post proceso de la información espacial que maneja el modelo hidráulico.

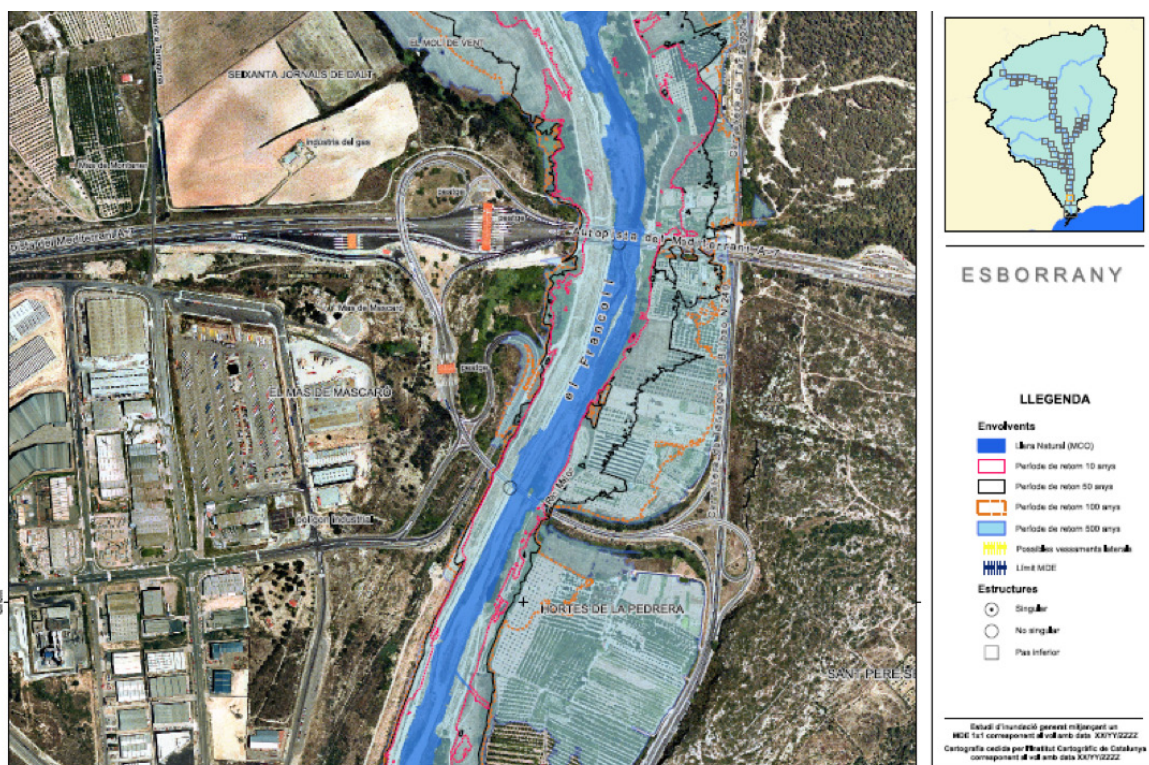
En el estudio de un cauce, por ejemplo, se utilizan para

el estudio hidrológico y cálculo de caudales previo al cálculo hidráulico, para regionalizar o agregar las variables y parámetros y para utilizar sus resultados (archivo de geometría) como entradas del modelo.

El flujo es modelizado con un software diseñado específicamente para ello, como los que se acaban de presentar, y posteriormente, las salidas de este modelo son nuevamente exportadas a un SIG para su procesamiento y representación gráfica. La representación de la llanura de inundación para un caudal de periodo de retorno dado es posible únicamente mediante esta técnica.

Esta conexión de los SIG con los modelos hidrológicos e hidráulicos ha sufrido una lógica evolución en la última década: los SIG comenzaron a utilizarse de forma aislada a los modelos, como herramientas para regionalizar, agregar y/o calcular variables y parámetros, usando los resultados como entradas a los modelos; pero últimamente han proliferado las aplicaciones, macros, extensiones o módulos que conectan directamente SIG y modelo, y además en relación biunívoca.

FIGURA 3.14. Ejemplo de cartografías accesibles desde el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Zona inundable.



En esta línea, surgieron las conexiones entre los programas del HEC (HEC-HMS para hidrología y HEC-RAS para hidráulica) con los productos ESRI (primero ArcINFO y ArcView y posteriormente ArcGIS), a través de las extensiones HEC-GeoHMS y HEC-GeoRAS, respectivamente.

El primero de ellos, HEC-GeoHMS (Doan, 2003), permite extraer información topográfica, topológica e hidrológica desde un MDE, para luego introducirla en HEC-HMS como ayuda en la elaboración del modelo de cuenca.

El segundo, HEC-GeoRAS (Ackerman, 2002), permite conectar el SIG (la versión 4.3 con ArcGIS 9.3) y el modelo hidráulico unidimensional en una doble dirección: desde el MDE (en su modelo vectorial de triángulos irregulares TIN) se extrae la información geométrica necesaria (menú PreRAS) que, una vez empleada en HEC-RAS, permite ser de nuevo exportada al SIG para obtener zonas inundables, batimetrías, velocidades... (menú PostRAS).

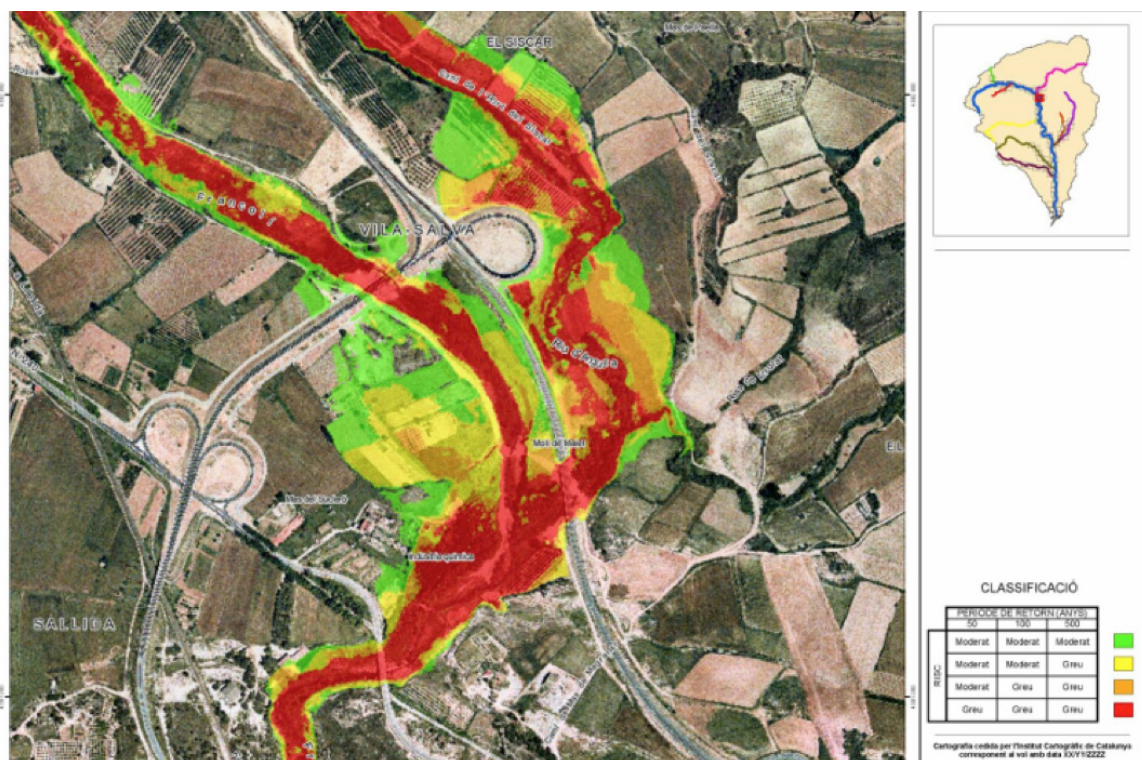
Todas las aplicaciones para la modelación hidráulica bidimensional se apoyan en los SIG, tanto para dar formato a los datos de entrada, como para la implementación de

los cálculos internos y los formatos de salida. Así, algunos de los programas de uso más difundido como MIKE-Flood (y su componente bidimensional MIKE 21), SOBECK, o GUAD2D precisan coberturas SIG de entrada (normalmente en formato matricial) con los MDE de alta precisión (procedentes, por ejemplo, de LIDAR) o con parámetros de rugosidad del terreno a la circulación del agua en régimen de lámina libre (valores de n ó m de Manning).

Finalmente, citar el modelo de flujo bidimensional GIS-PLANA que es concebido por el CEDEX como un verdadero Sistema de apoyo a la decisión (SAD) al estar formado por un SIG, un modelo hidráulico y una Interface Gráfica de Usuario (IGU)

La última generación en este tipo de desarrollos es la aplicación GeoFIRM (Olivera et al., 2006), que se postula como una herramienta para la delineación automática de áreas inundables, compuesta por tres módulos: cartográfico, hidrológico (programa NFF) e hidráulico (programa HEC-RAS).

FIGURA 3.15. Ejemplo de cartografías accesibles desde el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Riesgo de inundación.



3.2.4. Mapas de peligrosidad y riesgo de inundación en la planificación territorial y urbanística.

El concepto de *riesgo* fue identificado por la UNESCO en 1972 como *la expectativa de que se produzca una pérdida de vidas humanas, bienes naturales o capacidad productiva*. Diversos términos como la peligrosidad, la exposición o la vulnerabilidad hacen relación a variables para la evaluación de este riesgo.

Las inundaciones provocadas por el desbordamiento de ríos y embalses son, en general, las catástrofes naturales que mayor cantidad de daños humanos y materiales producen en España, alcanzando un valor medio anual próximo al 0,1 % del PIB y habiéndose producido más de dos centenares de víctimas mortales en nuestro país durante la última década. Este riesgo es potencialmente más acusado en las ramblas y ríos mediterráneos, que se caracterizan por tener una escorrentía de carácter torrencial que con frecuencia provoca avenidas e inundaciones. Es de reseñar en este sentido y ámbito que el “Proyecto de obras de defensa contra las inundaciones en el valle del Segura” es considerado el primer plan integral de defensa contra avenidas fluviales elaborado en el mundo (Muñoz, 2002).

Por este motivo, las diferentes administraciones públicas (estatales, autonómicas y locales) están adoptando, desde hace décadas, diferentes estrategias para mitigar el riesgo o minimizar sus efectos.

El tratamiento de esta problemática específica puede ser abordado desde diversas perspectivas teóricas: Una consiste en la delimitación de las áreas de riesgo de inundación, detectables a partir de la topografía del territorio y de la geomorfología de los cauces de los ríos y ramblas, y en la determinación de los efectos que podrían tener en los diferentes usos del suelo que intersecan a las zonas de riesgo potencial.

Otra, persigue la simulación del movimiento y la acumulación del flujo de agua de escorrentía superficial, mediante los modelos ya referidos en los apartados previos, para la generación de la llanura de inundación esperada para un periodo de retorno determinado. En este sentido es pionero en España el Plan de Acción Territorial del Riesgo de Inundación de la Comunidad Valenciana (PATRICOVA), redactado en 2003, con su de-

terminación del riesgo de inundación a escala 1:50000 y su orientación sobre zonas de inundación y nivel de riesgo asociado (Figuras 3.14 y 3.15). Sus disposiciones son vinculantes y de obligado cumplimiento en todos los planes territoriales y de ordenación urbana.

Destacar también otros proyectos del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino como el LINDE (1993), de delimitación del dominio público hidráulico o el proyecto PICRHA (Plan integral de de cuenca de restauración hidrológico-ambiental) de 1994, o planes autonómicos de protección civil como el INUNCAT (Plan de Emergencias por Inundaciones de Cataluña) que zonifica el territorio catalán a partir de un triple análisis: de peligrosidad, de vulnerabilidad e histórico.

3.2.4.1. El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables y los mapas de riesgo de inundación en el planeamiento municipal.

Debido a la amplia afección territorial y a la gravedad de las consecuencias derivadas de las avenidas e inundaciones, el Parlamento Europeo y el Consejo incluyeron, hace ya una década, entre sus principales objetivos a alcanzar por los países miembros en el desarrollo de la política de aguas comunitaria, la protección ante los efectos devastadores de estas. La Directiva 2000/60/CE de 23 de Octubre establecía un marco Comunitario de Actuación que ratificaría más tarde la Directiva 2007/60/CE de 23 de Octubre, relativa a la evaluación y gestión de los Riesgos de Inundación.

Esta Directiva 2007/60/CE, muy criticada por algunos autores (Gil, 2010), incluye 25 considerandos, a modo de preámbulo, ocho capítulos, con un total de 19 artículos y un anexo. En el segundo considerando fija la atención en los asentamientos en llanuras aluviales, con la consiguiente pérdida de la capacidad de retención por los suelos impermeabilizados, y fundamenta la adopción de medidas no-estructurales de ordenación del territorio a través del reconocimiento y cartografía de las áreas inundables que faciliten el adecuado control de los llanos de inundación.

Los considerandos 12 a 14, respectivamente, recomiendan la necesaria “*elaboración de mapas de peligrosidad por inundaciones y de mapas de riesgo de inundación,*

incluida la información sobre fuentes potenciales de contaminación del medio...”, al objeto de que los Estados miembros evalúen las actividades que incrementan los riesgos de anegación y la conveniencia del “establecimiento de planes de gestión del riesgo de inundación”.

La primera de las disposiciones generales reclama como objetivo de la Directiva el de “establecer un marco para la evaluación y gestión de los riesgos de inundación, para reducir las consecuencias negativas para la salud humana, el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica”. A las definiciones de “río”, “cuenca hidrográfica”, “subcuenca” y “demarcación hidrográfica”, incluidas en la Directiva 2000/60/CE, el art. 2 incorpora las de “inundación” y “riesgo de inundación”.

De especial trascendencia es el mandato del art. 6, a tenor del cual los Estados miembros habrán de preparar, para cada demarcación hidrográfica y unidad de gestión, a la escala más adecuada, mapas de peligrosidad por inundaciones y asimismo los de riesgo por inundación.

Los primeros incluirán las zonas inundables, diferenciándolas por las categorías de baja probabilidad, contraída a episodios extremos, probabilidad media, con umbral no inferior a 100 años y, por último, las de mayor riesgo, indicando extensión y calados de la inundación y, en su caso, velocidad y caudal de la corriente causante.

En cuanto a los mapas de riesgo de inundación, deberán indicar las consecuencias adversas potenciales, refiriéndolas a población afectada, tipo de actividad económica interesada, instalaciones que puedan ocasionar contaminación en estas circunstancias y, por último, cualquier otro tipo de información que el Estado miembro considere útil. Como fecha límite para elaboración de ambos mapas la Directiva fija la de 22 de diciembre de 2013.

El Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, siguiendo los principios de esta directiva, ha puesto en marcha recientemente el **Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI)**, un instrumento de apoyo a la gestión del espacio fluvial, la prevención de riesgos, la planificación territorial y la transparencia administrativa y que recopila los trabajos sobre inundaciones ya efectuados y los que se elaboren en el fu-

turo, e implanta una aplicación que facilita su consulta y gestión a través de Internet. La escala de trabajo seleccionada es 1:5.000 y un plazo temporal de tres años (Yagüe, 2007).

La información puede ser consultada e incluso descargadas las coberturas de los trabajos recopilados en el enlace:

www.mma.es/portal/secciones/acm/aguas_continent_zonas_asoc/prevencion_inundaciones/cartografia_inundables. (Figuras 3.16 y 3.17)

El eje central del SNCZI es el visor cartográfico de zonas inundables, una aplicación informática que permite a los usuarios visualizar, sobre mapas catastrales y fotografías aéreas, entre otras opciones, los estudios de delimitación del Dominio Público Hidráulico (DPH) y los mapas de peligrosidad de inundaciones de todo el territorio nacional.

Este visor sirve de ayuda a los organismos de cuenca en la emisión de informes sobre autorizaciones en el DPH, en la gestión de avenidas en conexión con el S.A.I.H. (Sistema Automático de Información Hidrológica) y en la planificación de las actuaciones de defensa frente a inundaciones, agiliza la planificación y gestión de inundaciones por los servicios de Protección Civil, facilita la transmisión de información sobre zonas inundables a las administraciones competentes en planificación territorial, y permite a cualquier usuario conocer la peligrosidad de una zona determinada.

La metodología seguida para la elaboración de estas cartografías es la siguiente:

- Estudio preliminar básico de peligrosidad de inundaciones
- Delimitación del Dominio Público Hidráulico (DPH), Zona de Flujo Preferente (ZFP) y llanuras para periodos de retorno de 100 y 500 años.
- Trabajo de campo y gabinete geomorfológico y ambiental
- Cartografía mediante LIDAR y ortofotografía aérea.
- Utilización del Mapa de Q máximos del CEDEX.
- Modelación hidráulica.
- Generación de cartografía digital.

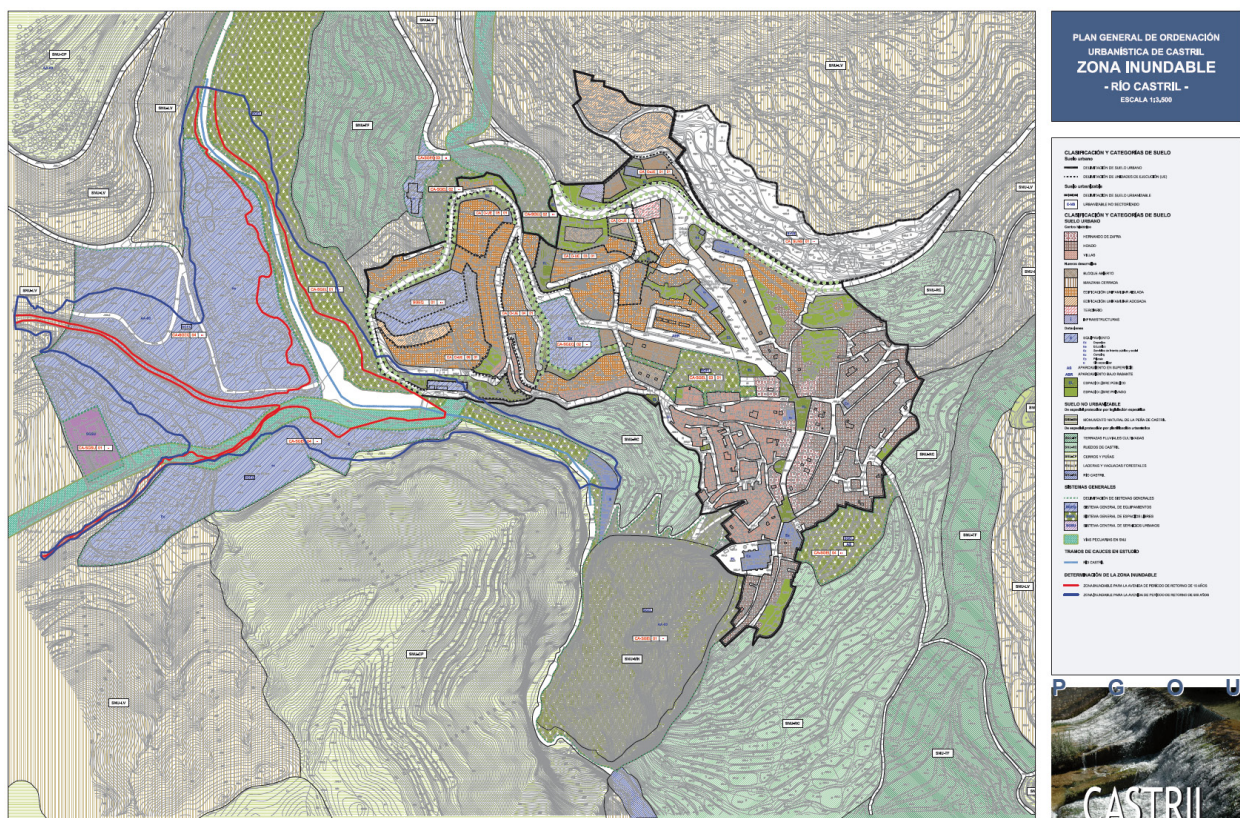
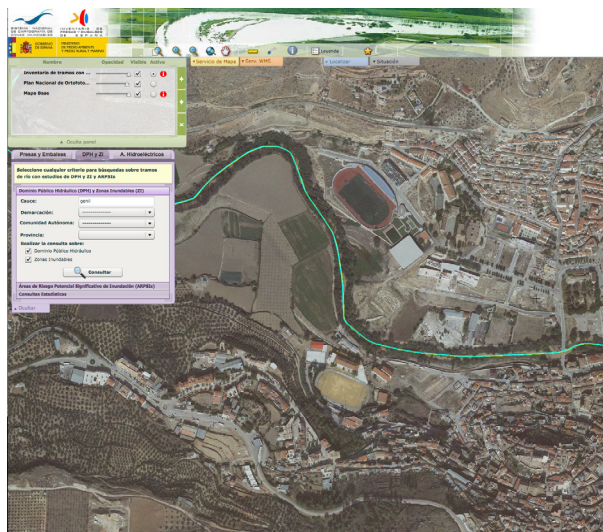
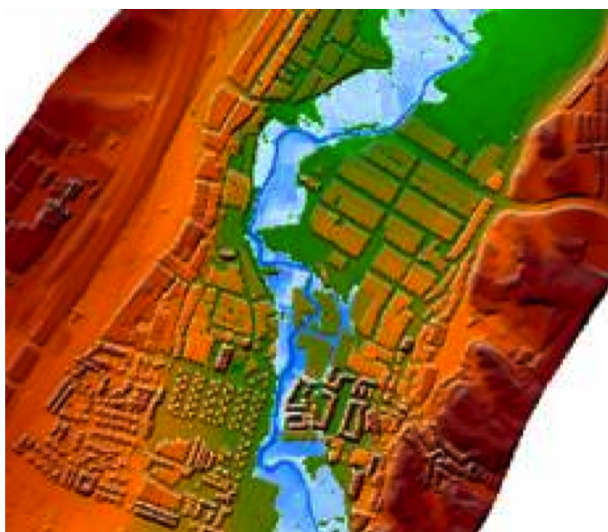


FIGURA 3.16. Muestra de las cartografías incluidas en el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

FIGURA 3.17. Visor del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.

FIGURA 3.18. Cartografía de zonas inundables para el planeamiento de Castril (Granada). Elaboración propia

Ya en el ámbito autonómico, el **Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en Cauces Urbanos Andaluces** aprobado en el Decreto 189/2002 de 2 de julio, constituye el marco general de intervención en la comunidad andaluza. Tiene como objetivo general prevenir y minimizar los riesgos de inundaciones en los núcleos urbanos andaluces mediante la intervención a través de la planificación territorial y urbanística. Entre sus programas y acciones se encuentra la delimitación de los cauces públicos y de sus zonas inundables (Art. 7).

En esta misma dirección, la **Agencia Andaluza del Agua (AAA)**, organismo que depende de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, y que tiene como labor coordinar y desarrollar todas sus competencias en materia de aguas, aporta una serie de recomendaciones para la coordinación hidráulica, territorial y urbanística, referentes al planeamiento municipal.

Estas **recomendaciones sobre el contenido mínimo de los instrumentos de planeamiento urbanístico en materia de aguas** comienzan haciendo referencia a la ley de aguas:

La ley de Aguas establece, en su artículo 25.4, que la Administración Hidráulica emitirá informe previo sobre los actos, planes y ordenanzas de competencia autonómica o local que afecten al régimen y aprovechamiento de las aguas continentales, a los usos permitidos en terrenos de dominio público hidráulico y en sus zonas de servidumbre y policía y cuando comporten nuevas demandas de recursos hídricos.

Estas recomendaciones, se cita textualmente, *tienen el objetivo de armonizar y de ofrecer unas indicaciones a la elaboración del planeamiento urbanístico y territorial, así como a sus revisiones, en aquellos aspectos relativos a aguas, estableciendo orientaciones sobre el nivel de detalle con el que deben ser introducidos una serie de contenidos que afectan al patrimonio hidráulico: agua como bien natural, medio físico por el que discurre de forma natural e infraestructuras del agua (regulación, captación, transporte, tratamiento, vertido y de defensa ante riesgos de inundación)*. Así mismo, se recogen una serie de limitaciones de uso y prohibiciones que deben ser observadas para el cumplimiento de la legislación vigente.

Las recomendaciones se estructuran en cinco apartados:

- Dominio público hidráulico
- Prevención de riesgos por avenidas e inundaciones
- Disponibilidad de recursos hídricos
- Infraestructuras del ciclo integral del agua (Abastecimiento, Saneamiento y depuración)
- Financiación de estudios e infraestructuras

Además se incorporan diversos recordatorios legales de los aspectos que se desarrollan con objeto de facilitar la elaboración del planeamiento. A este respecto la normativa citada es la siguiente:

- Ley 7/2002, de 17 de diciembre, de Ordenación Urbanística de Andalucía.
- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el reglamento del Dominio Público Hidráulico, modificado por Real Decreto 9/2008, de 11 de enero.
- Decreto 43/2008, de 12 de febrero, regulador de las condiciones de implantación y funcionamiento de campos de golf de Andalucía.
- Decreto 189/2002, de 2 de julio, por el que se aprueba el Plan de avenidas e inundaciones en cauces urbanos andaluces.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Decreto 206/2006, de 28 de noviembre, por el que se adapta el Plan de Ordenación del Territorio de Andalucía a las Resoluciones aprobadas por el Parlamento de Andalucía.
- Decreto 11/2008, de 22 de enero, por el que se desarrollan procedimientos dirigidos a poner suelo urbanizado en el mercado con destino preferente a la construcción de viviendas protegidas.
- Decreto 310/2003, de 4 de noviembre, por el que se delimitan las aglomeraciones urbanas para el tratamiento de las aguas residuales de Andalucía y se establece el ámbito territorial de gestión de los servicios del ciclo integral del agua de las Entidades Locales a los efectos de actuación prioritaria de la Junta de Andalucía.
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000.
- Decreto 206/2006, de 28 de noviembre, por el que se aprueba el Plan de Ordenación del Territorio de

Andalucía.

- Decreto 220/2006, de 19 de diciembre, por el que se regula el ejercicio de las competencias de la Administración de la Comunidad Autónoma de Andalucía en materia de ordenación del territorio y urbanismo y se modifica el Decreto 202/2004, de 11 de mayo, por el que se establece la estructura orgánica de la Consejería.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Decreto 70/2009, de 31 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Vigilancia Sanitaria y Calidad de Agua de Consumo Humano de Andalucía.

Los dos primeros apartados citados tienen relación directa con el cartografiado de las zonas inundables.

El primer apartado de Dominio Público Hidráulico señala:

Los planeamientos territoriales y urbanísticos incorporarán el deslinde, que en su término municipal tenga efectuado la Administración Hidráulica, y la delimitación del dominio público hidráulico y de las zonas de servidumbre y policía. Así mismo, recogerá una delimitación de las masas de aguas subterráneas existentes en el término municipal y la de los correspondientes perímetros de protección de las captaciones.

En el supuesto de que la Administración Hidráulica no dispusiera de la delimitación del dominio público hidráulico y de sus zonas, el planeamiento urbanístico incluirá un estudio hidrológico-hidráulico específico para su determinación, al menos, en aquellos cauces afectados por el desarrollo urbano.

El planeamiento urbanístico calificará al dominio público hidráulico y sus zonas de servidumbre como suelo no urbanizable de especial protección.

Las zonas de policía podrán ser calificadas como suelos no urbanizables o suelos urbanos y urbanizables con las limitaciones de actividades y usos establecidos en la normativa vigente.

El segundo apartado de Prevención de riesgos por avenidas e inundaciones añade:

El planeamiento incluirá, en los límites de su ámbito territorial, la delimitación de las zonas inundables, así como los puntos de riesgo recogidos en el Plan de Prevención de Avenidas e inundaciones en cauces urbanos andaluces.

En el supuesto de que la Administración Hidráulica no dispusiera de dicha delimitación, el planeamiento urbanístico incluirá un estudio hidrológico-hidráulico específico para su determinación, al menos, en aquellos cauces afectados por el desarrollo urbano.

El estudio hidrológico e hidráulico deberá ser supervisado por la Agencia Andaluza del Agua en cuanto a sus hipótesis de partida y métodos de cálculo. Dicha supervisión no supone, salvo señalamiento expreso, aceptación por parte de la Agencia en cuanto a sus resultados (área inundable, velocidad y calado para los diferentes periodos de retorno y niveles de riesgo).

En cuanto a los usos permitidos en zonas inundables el documento añade:

Los terrenos incluidos en zonas inundables serán clasificados, por los planes generales y sus modificaciones, como suelos no urbanizables de especial protección. El planeamiento de desarrollo, al no poder clasificar suelo, al menos, incorporará las limitaciones de usos en las zonas inundables.

Con carácter general, en las zonas inundables estarán permitidos los usos agrícolas, forestales y ambientales que sean compatibles con la función de evacuación de caudales extraordinarios.

Quedarán prohibidas las instalaciones provisionales o definitivas y el depósito y/o almacenamiento de productos, objetos, sustancias o materiales diversos, que puedan afectar el drenaje de caudales de avenidas extraordinarias.

A efectos de la ordenación de usos, y sólo en casos especiales en los que no se pueda evitar las zonas inundables para el crecimiento del núcleo urbano, en las de zonas inundables se diferenciarán tres ámbitos:

a) El correspondiente a los terrenos inundables para un periodo de retorno de 50 años y el de los de 100 años

cuando el calado de la lámina de agua sea superior a 0,5 metros y/o las velocidades del agua sean superiores a 0,50 m/s.

b) El correspondiente a los terrenos inundables para un periodo de retorno entre 50 y 100 años.

c) El correspondiente a los terrenos inundables para un periodo de retorno entre 100 y 500 años.

El planeamiento debe establecer los usos en cada uno de ellos atendiendo a los siguientes criterios:

Zona a): Prohibición de edificación e instalación alguna, temporal o permanente. Excepcionalmente y por razones de interés público podrán autorizarse edificaciones temporales. En cualquier caso, se prohibirán usos que conlleven un riesgo potencial de pérdida de vidas humanas.

Zona b): Prohibición de instalación de industria pesada y de industria contaminante según la legislación vigente, o con riesgo inherente de accidentes graves. En esta zona se prohibirán así mismo, las instalaciones destinadas a servicios públicos esenciales o que conlleven un alto nivel de riesgo en situación de avenida.

Zona c): Prohibición de instalación de industrias contaminantes, según la legislación vigente, con riesgo inherente de accidentes graves. En estas zonas se prohibirán así mismo, las instalaciones destinadas a servicios públicos esenciales o que conlleven un alto nivel de riesgo en situación de avenida.

Las propuestas del planeamiento urbanístico deberán justificarse de forma que se preserve del proceso de urbanización para el desarrollo urbano los terrenos en los que se hagan presentes riesgos de inundación.

*Los nuevos crecimientos urbanísticos deberán situarse en **zona no inundable**. En caso de que resultara inevitable la ocupación de terrenos con riesgo de inundación, se procurará orientar los nuevos crecimientos hacia las zonas inundables de menor riesgo, siempre que se tomen las medidas oportunas y se efectúen las infraestructuras necesarias para su defensa.*

El planeamiento recogerá para los puntos de riesgo inventariados la solución prevista para su corrección, así como las medidas que se prevean adoptar mientras se alcanza la citada solución.

3.2.4.2. Avances en la gestión del riesgo de inundación.

Las mayores innovaciones en el análisis de la peligrosidad de inundación que se han producido en los últimos años en nuestro país han tenido como protagonistas a los Sistemas de Información Geográfica.

Los primeros son avances significativos en la disponibilidad de los datos de partida en el estudio hidrológico de avenidas. Así, los datos de precipitaciones máximas diarias (con sus relaciones IDF), que clásicamente se obtenían de forma puntual a partir de los datos de estaciones meteorológicas, han pasado a estar disponibles desde aplicaciones basadas en regionalizaciones e interpolaciones soportadas por SIG, que permiten obtener los valores para cualquier punto del territorio.

En este campo destacan las siguientes aplicaciones:

- MAXPLUWIN (DGC, 1999), desarrollada por técnicos del CEDEX para la Dirección General de Carreteras, y que parte de datos de precipitaciones máximas de más de 1500 estaciones pluviométricas en la España peninsular, a los que se ha aplicado un análisis estadístico con la función de distribución SQRT-ETmax, y regionalizaciones e interpolaciones con SIG de parámetros como la precipitación media y el coeficiente de variación.
- MAXIN (Salas et al., 2005 y 2008), desarrollada en la Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología de la E.U.I.T. Forestal (Universidad Politécnica de Madrid), que avanza sustancialmente respecto a la anterior la aplicación de mejoras en las curvas IDF en la estimación de los cuantiles (basadas en la tesis doctoral de la primera de las autoras). Además a partir de MAXIN se ha confeccionado una conexión con productos ESRI (ArcView), denominada AQUALIS (Muñoz, 2002), y que permite obtener de una manera fácil y rigurosa el valor de la precipitación máxima diaria en cuencas o subcuencas hidrográficas.

Ambos desarrollos pueden descargarse gratuitamente en la dirección web de la E.U.I.T. de Forestales de la UPM, Unidad de Hidráulica e Hidrología:

(http://www.forestales.upm.es/unidad_enlaces.aspx).

Otro aspecto importante que ha tenido interesantes avances en los últimos años, ha sido la obtención de parámetros hidrográficos (red de drenaje, delineación de cuencas, conectividad...) y morfométricos (longitudes, pendientes...) a partir de los modelos digitales de elevación (MDE).

En este sentido merece la pena citar el modelo ArchHydro (Maidment, 2002), una estructura de datos para ArcGIS (ESRI) que conecta los datos hidrológicos con diversos aspectos de la modelización de los recursos hídricos y los métodos de toma de decisiones.

También apoyándose en los SIG se han generado coberturas matriciales, para toda la España peninsular y con resolución espacial de 1x1 km, de parámetros hidrológicos tan importantes como el número de curva o su correspondiente umbral de escorrentía (Ferrer, 2003), mediante la superposición de las variables que intervienen en su estimación convenientemente reclasificadas: pendiente, vegetación o usos del suelo, y tipo de suelo.

A partir de estos valores de umbral de escorrentía transformados a coeficiente de escorrentía, y de los procedentes de las precipitaciones máximas que ofre-

ce MAXPLUWIN, se han elaborado los mapas de caudales máximos esperables mediante el método racional modificado para diferentes periodos de retorno y régimen natural en todas las cuencas españolas (CEDEX; Jiménez, 2007).

Los SIG también se pueden emplear para obtener y cruzar entre sí las diferentes variables y parámetros que controlan la exposición y vulnerabilidad, normalmente extraídos de bases de datos socio-económicas, como el Censo de población o el Catastro.

En este sentido cabe destacar la reciente publicación digital del Instituto de Estadística de Andalucía "Cartografía censal de Andalucía: Mapas temáticos por secciones 2001-2007" y un ejemplo de este tipo de obtención con SIG de coberturas de exposición y vulnerabilidad para más de una treintena de variables, que se realizó para el análisis de riesgo del plan de protección civil de Castilla-La Mancha (Díez et al., 2008)

A otra escala espacial distinta, también se han empleado los SIG durante los últimos años en los inventarios y análisis de la exposición y vulnerabilidad ante el riesgo de inundaciones para los análisis de riesgo en los planes de protección civil de ámbito local (Díez et al., 2003).

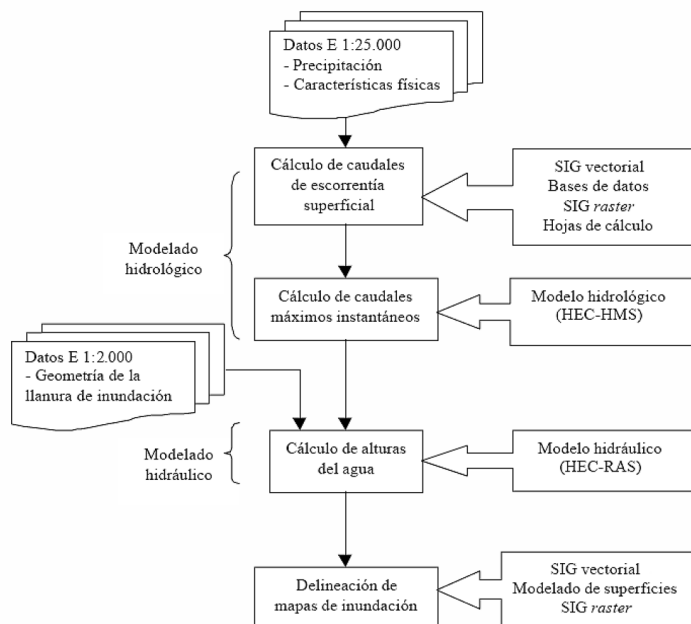


FIGURA 3.19. Esquema metodológico del proceso a seguir en un estudio hidrológico-hidráulico.

3.2.4.3. Ejemplo de Aplicación.

Se presenta a continuación un ejemplo de las cartografías obtenidas al seguir la metodología recomendada por la Agencia Andaluza del Agua en los estudios hidrológico-hidráulicos, aplicada a un cauce natural para la generación de las llanuras de inundación de un cauce afectado por nuevos sectores de planeamiento. El proceso seguido se muestra en las figura 3.19.

Un paso previo a la modelización hidráulica es el cálculo de la escorrentía superficial generada en cada subcuenca por las tormentas de diseño y el modelado hidrológico de la cuenca para la obtención de los caudales máximos instantáneos en diferentes puntos de la red de drenaje. Este cálculo se realiza mediante el método racional (para superficies de cuenca menores de 500 km²) o mediante el método estadístico. En este paso es aconsejable la consulta del Mapa de Caudales Máximos en España (CEDEX).

El análisis del comportamiento hidráulico se lleva a cabo mediante modelización matemática del sistema fluvial, llegándose finalmente a la determinación de la zona ocupada por la lámina de agua o llanura de inundación para los periodos de retorno de 10, 50 100 y 500 años. Esta modelización debe ser coherente con la información histórica y morfológica del tramo a estudiar.

Metodología de cálculo:

Se utiliza el software ArcView (de la casa comercial ESRI) en su versión 3.2 y su extensión HEC GeoRAS 3.1.1 para el preprocesamiento de la información, generación del modelo digital de elevaciones (MDE) a partir de los archivos CAD de curvas de nivel y puntos acotados (Figura 3.20), edición de las líneas que definen el eje, las márgenes y el centro de masas del flujo (Figura 3.21), localización y digitalización de las secciones transversales y creación del fichero de geometría (Figura 3.22).

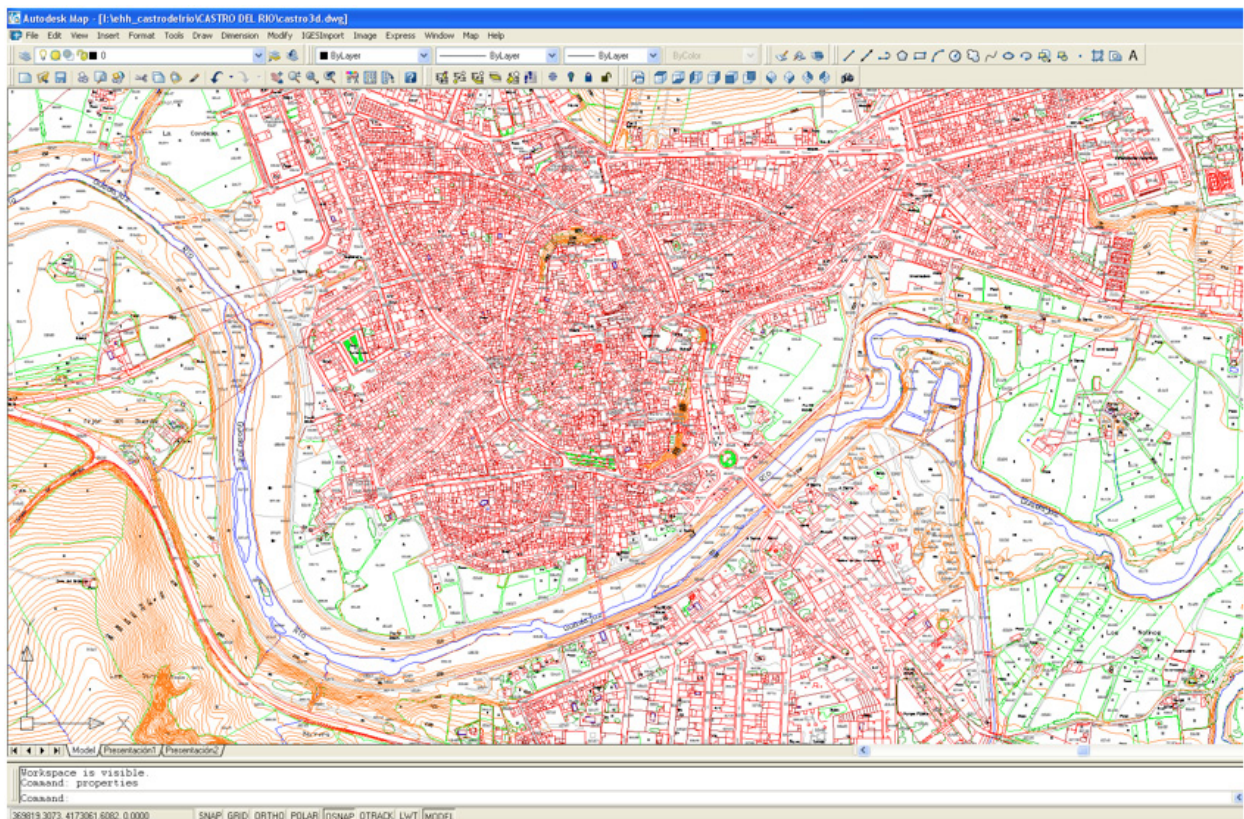


FIGURA 3.20. Cartografía base a escala 1:2000 en formato CAD. Equidistancia entre curvas de nivel de 1 metro

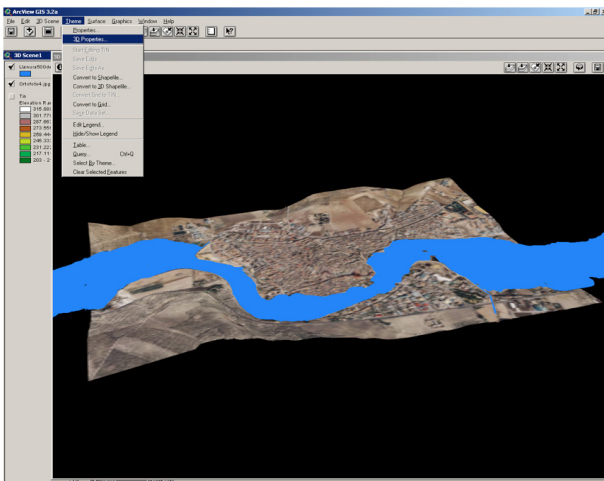
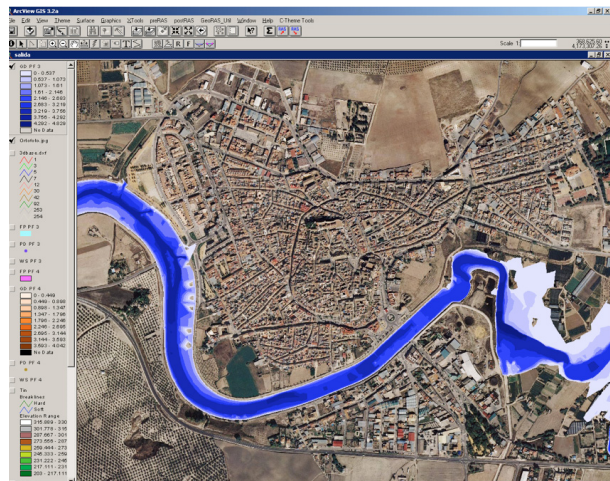
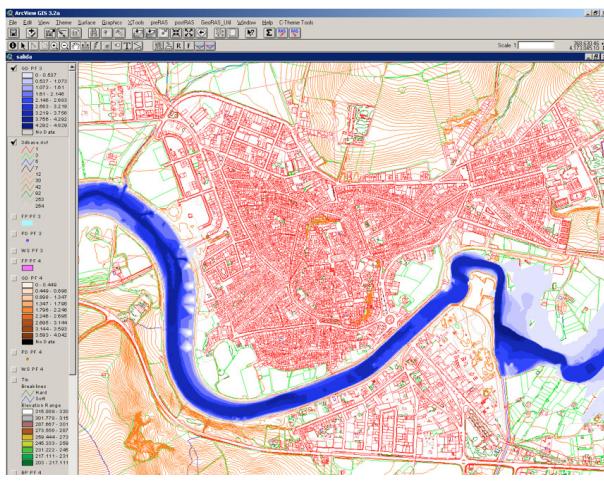
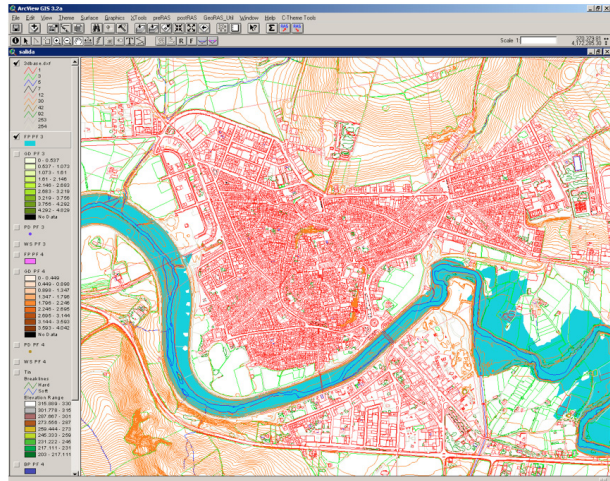
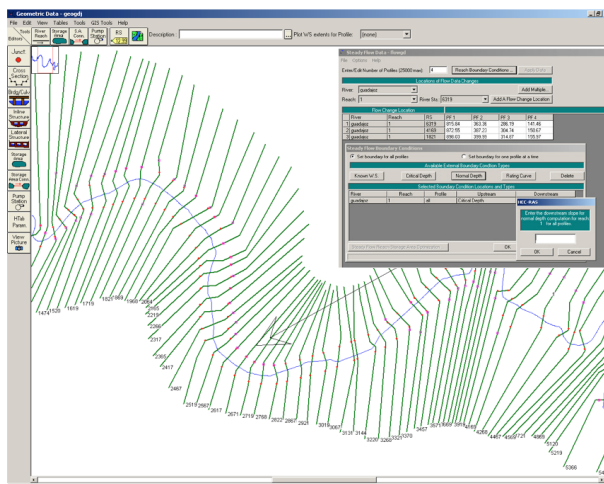
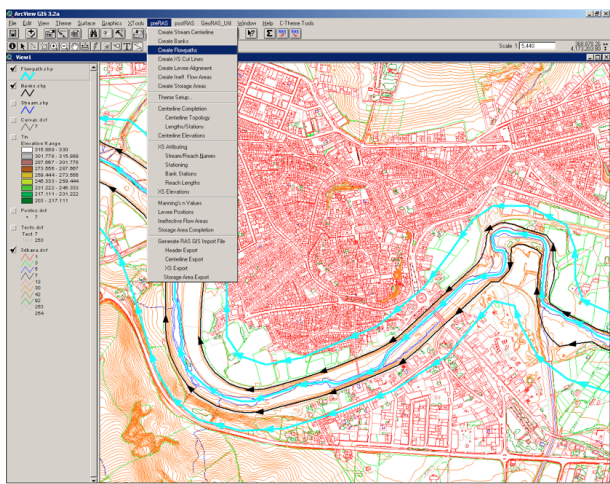


FIGURA 3.21. Delineación del eje, banks y flowpath. Módulo PreRas del Hec GeoRas.

FIGURA 3.22. Archivo de geometría con secciones transversales. HecRAS

FIGURA 3.23. Salida gráfica de la zona inundable. Módulo PostRas del Hec GeoRas

FIGURA 3.24. Grid de profundidad sobre cartografía base.

FIGURA 3.25. Grid de profundidad sobre ortofotografía aérea.

FIGURA 3.26. Visor tridimensional de ArcGis.



FIGURA 3.27. Ortofotografía base.

FIGURA 3.28. Zona inundable de Puente del Obispo. Baeza.

FIGURA 3.29. Sectores de Planeamiento. PGOU de Puente del Obispo (Baeza).

FIGURA 3.30. Crecida del Guadalquivir a su paso por este núcleo.

FIGURA 3.31. Zona Inundable del núcleo urbano de la Yedra (Baeza). Elaboración propia

Este fichero es posteriormente leído por el software HecRas (actualmente en su versión 4.1).

Este modelo permite la simulación hidráulica en régimen permanente o transitorio de una red de cauces naturales, encauzados o canalizados con el fin de obtener el perfil de la superficie libre mediante la resolución de la ecuación de la energía por el Standard Step Method (método paso a paso).

El procedimiento básico de cálculo se centra en la resolución de la ecuación de la energía en su forma unidimensional.

Se tienen en cuenta las pérdidas de energía causadas por la fricción y las localizadas en contracciones y expansiones (a través de un coeficiente multiplicador del cambio en la altura de velocidad).

Finalmente los resultados generados se vuelven a procesar con ArcView o arcGis para la generación de las llanuras de inundación (mediante técnicas de cálculo de volúmenes entre dos mdts) para cada periodo de retorno y cuenca (Figuras 3.23 a 3.26) y su posterior cruce con las capas de usos del planeamiento (Figuras 3.27 a 3.31).

Un manual básico del manejo de HecRas y HecGeoras y un ejemplo práctico sencillo pero completo, ambos de elaboración propia se puede descargar desde la web del Laboratorio de Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Granada mediante el enlace:

www.urbanismogranada.com/descargas.php

3.2.5. Cartografías temáticas en la gestión integrada de cuencas hidrográficas.

Se muestran en este apartado parte de los resultados gráficos generados por el autor en diversos proyectos de investigación relacionados con la gestión de cuencas hidrográficas, desarrollados en el seno del Laboratorio de Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Granada.

Estas imágenes reflejan el interés de estas representaciones cartográficas en los procesos de planificación y gestión integrada de cuencas hidrográficas.

3.2.5.1. Caracterización territorial y procesos de transformación en la cuenca del Guadalfeo (Granada).

Con motivo del convenio suscrito entre la Consejería de Obras Públicas y Transporte y la Universidad de Granada en Noviembre de 2002, se desarrolla el “**Estudio Piloto para la Gestión Integrada de la Cuenca del Río Guadalfeo**”.

Uno de los ocho grupos de investigación implicados, coordinados por D. Miguel Losada Rodríguez, se encuentra el denominado GUOT (Grupo de Urbanismo y Ordenación del Territorio), formado por el Grupo de Investigación “Proyectos Territoriales y Urbanos” (Cód. P.A.I. RNM 237), del Área de Urbanismo y Ordenación del Territorio, dirigidos por el Dr. José Luis Gómez Ordóñez y coordinados por el Dr. Alejandro Luis Grindlay Moreno.

Se desarrollan en este estudio una serie de subtareas de caracterización territorial, como el desarrollo del Sistema de Información Geográfica (SIG), la elaboración de un modelo digital de elevaciones (MDE) (Figura 3.32), que proporciona además mapas derivados de pendientes y de orientaciones, así como la delimitación de la cuenca y subcuencas hidrográficas y redes de drenaje, la elaboración de la cartografía digital del planeamiento, cartografías de los principales procesos de transformación, finalmente se realiza una previsión del crecimiento urbano y sus efectos sobre el balance hídrico, proponiendo una serie de escenarios temporales a partir del uso de modelos predictivos de cambio de los usos del suelo.

3.2.5.2. Propuesta de ámbitos para la coordinación hidrológico-territorial en la cuenca hidrográfica del Guadalquivir.

Coincidiendo con la transferencia del Estado Español a la Junta de Andalucía de las competencias relativas a la gestión del agua en el territorio andaluz, en la Comunidad Autónoma Andaluza se ha pasado de un enfoque de gestión basado principalmente en las obras de infraestructuras a un enfoque más amplio.

El proceso de planificación actual se construye sobre la base de la experiencia pasada, recogida en los Planes Hidrológicos vigentes, de la planificación hidrológica sectorial, como las actuaciones para la reducción

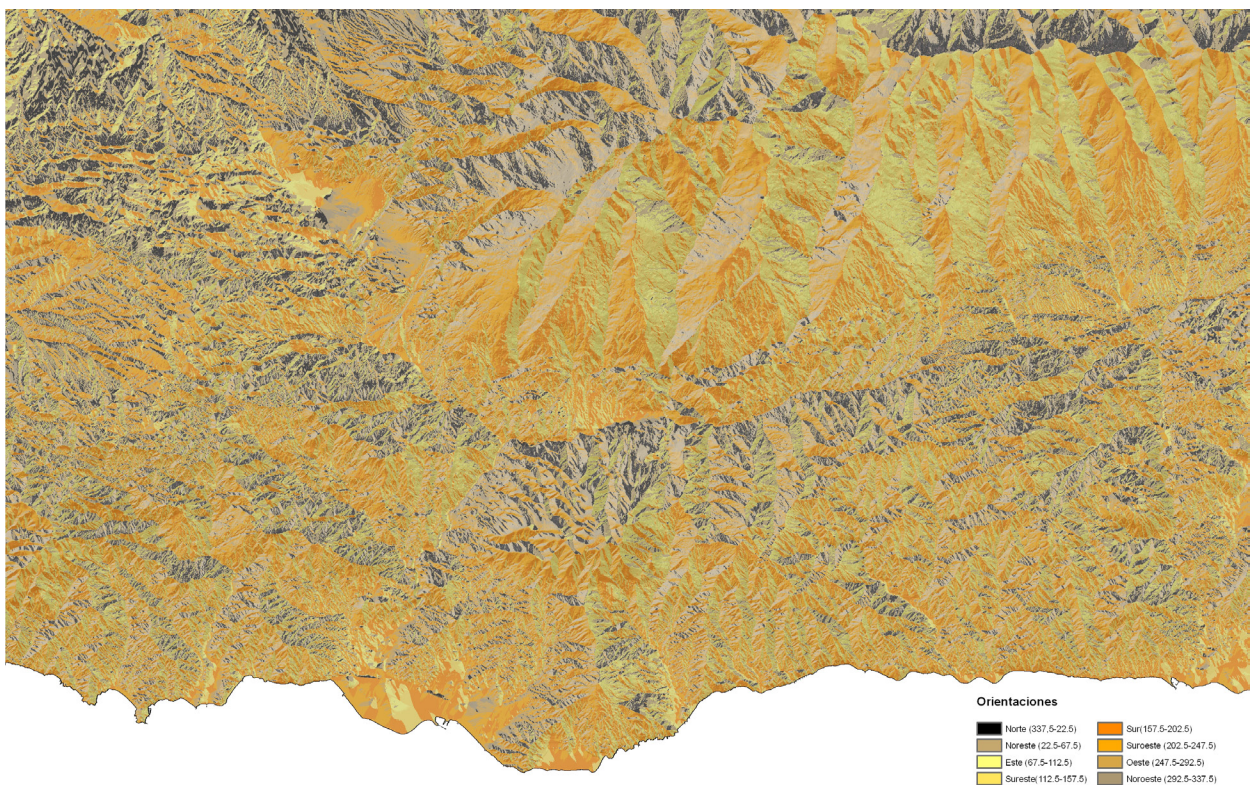
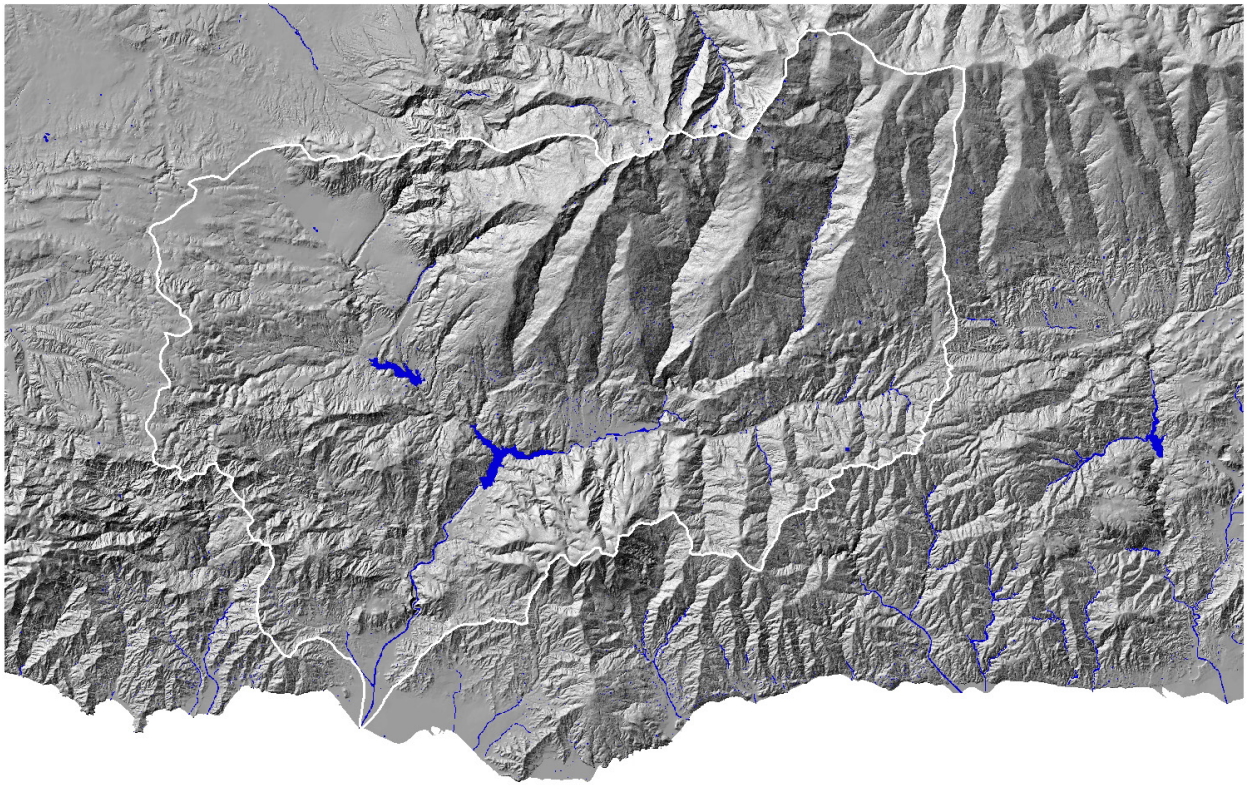


FIGURA 3.32. Delimitación de la cuenca del río Guadalfeo sobre Modelo Digital de Elevaciones. Elaboración propia.

FIGURA 3.33. Mapa derivado de Orientaciones. Elaboración propia.

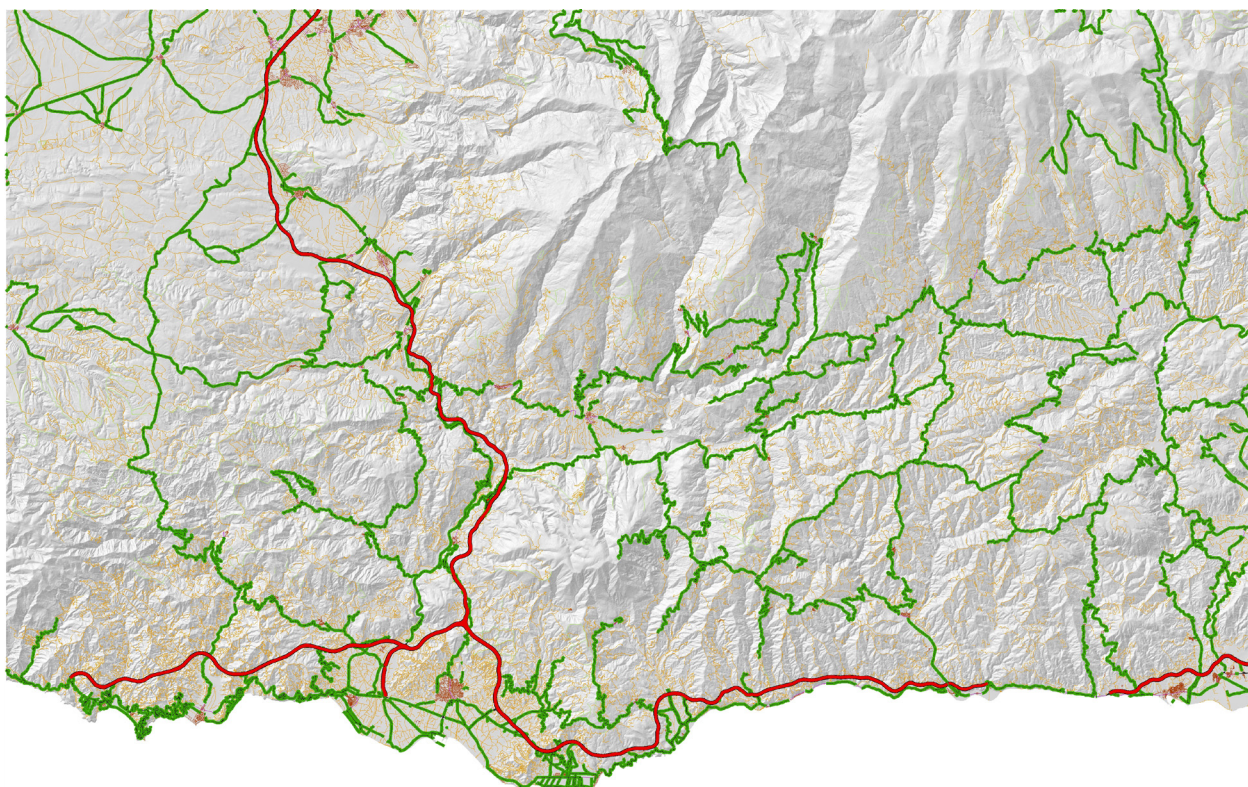
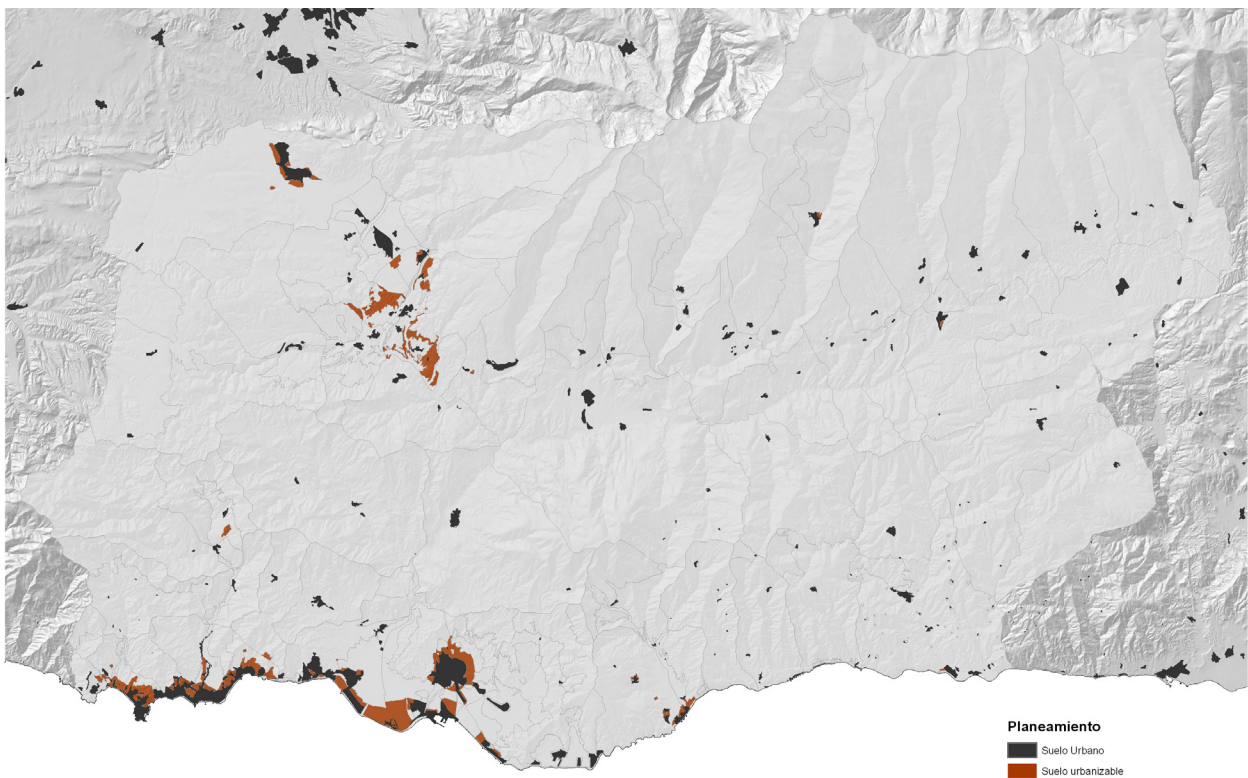


FIGURA 3.34. Planeamiento vigente. Elaboración propia .

FIGURA 3.35. Red viaria propuesta. Elaboración propia.

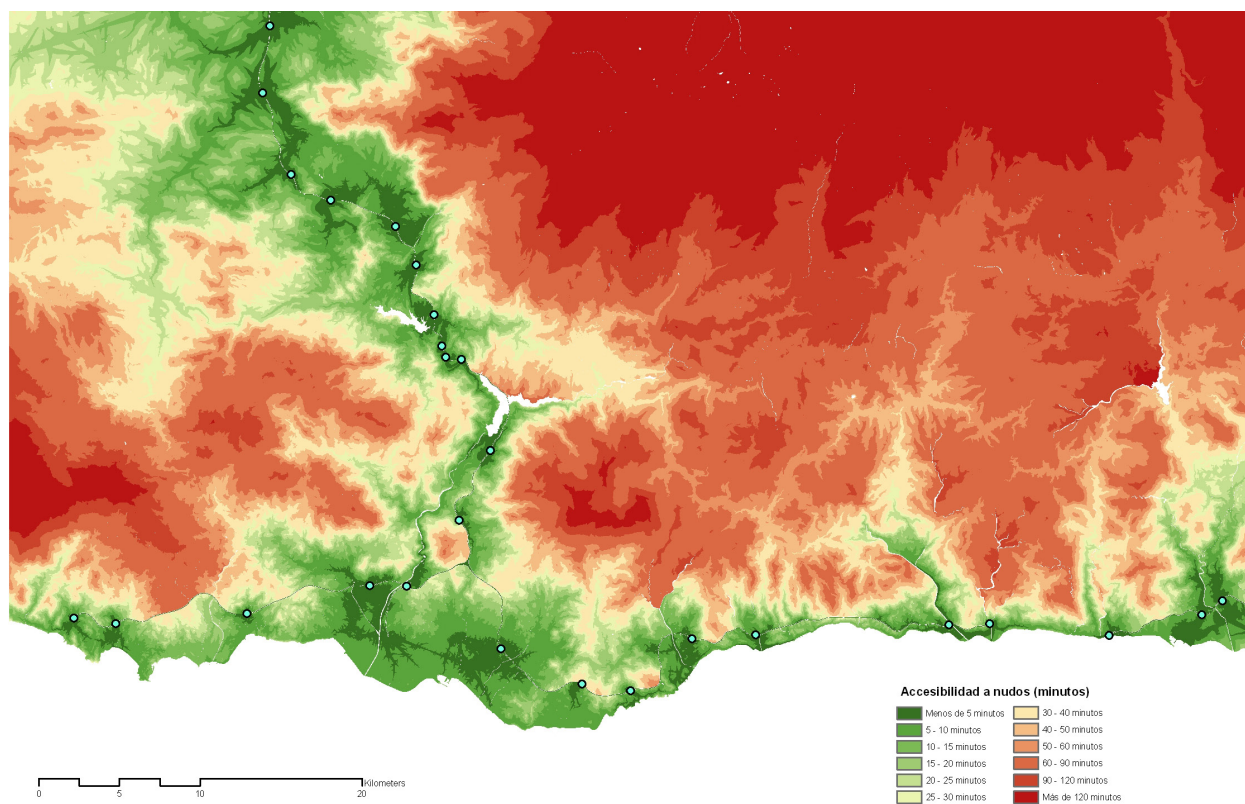
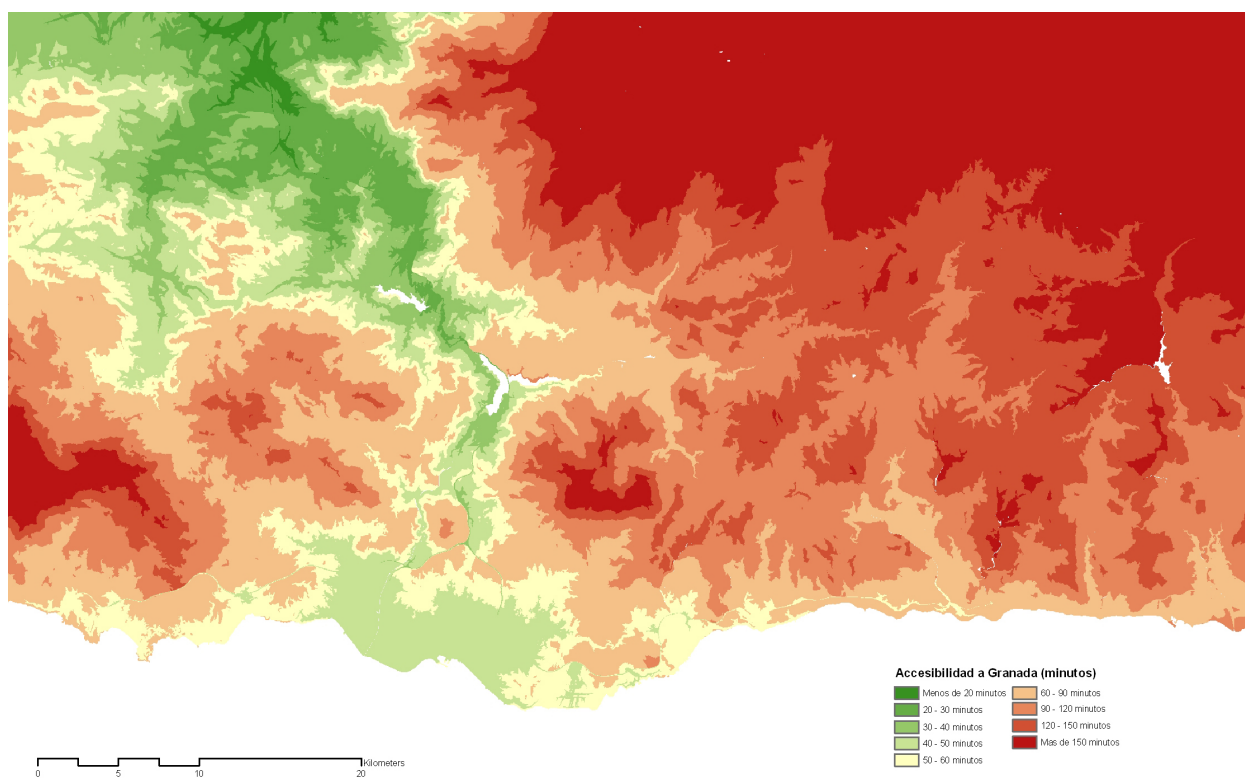


FIGURA 3.36. Accesibilidad territorial con objetivo Granada. Isocronas.

FIGURA 3.37. Accesibilidad territorial con objetivo nudos de Autovía. Isocronas.

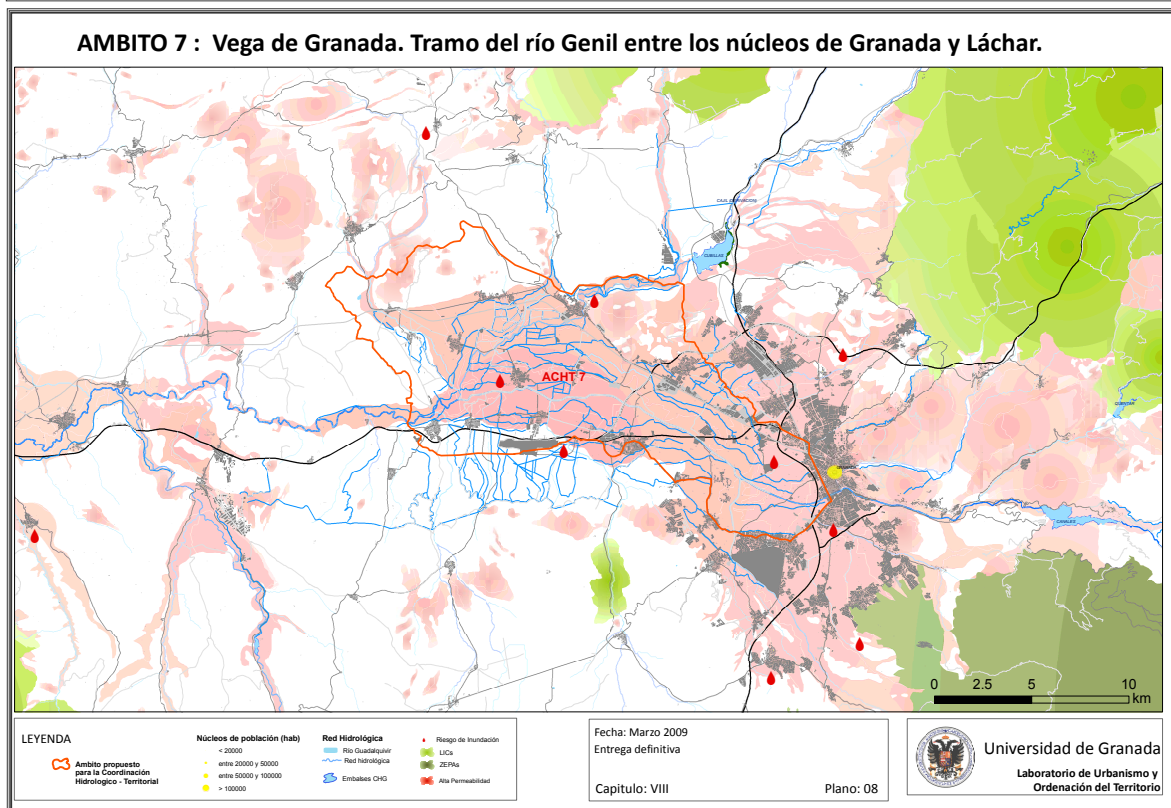
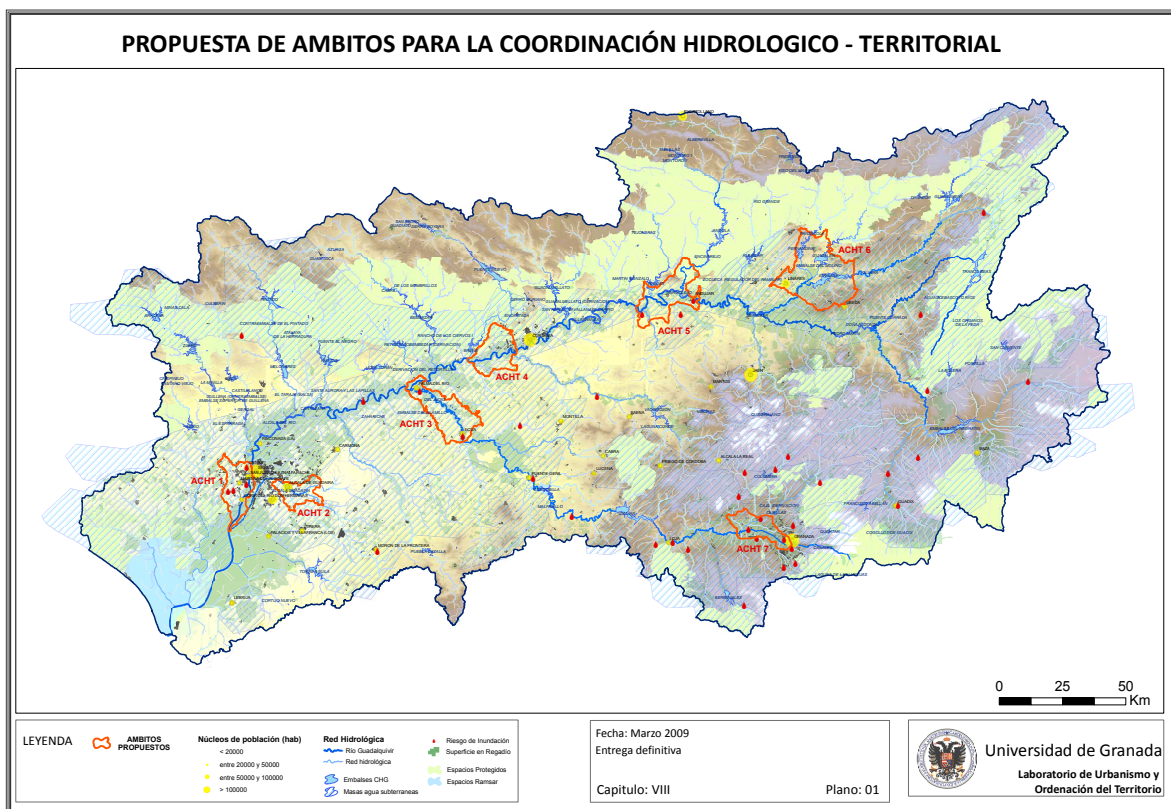


FIGURA 3.38. Propuesta de Ámbitos para la coordinación Hidrológico-Territorial. Cuenca del Guadalquivir. Elaboración propia.

FIGURA 3.39. Ámbito propuesto en la Vega de Granada. Elaboración propia.

de riesgos hidrológicos (sequías e inundaciones) y la restauración de ríos, pero va más allá de la puesta en marcha de planes específicos y aislados de actuación en cada una de sus cuencas hidrográficas.

El nuevo enfoque de la planificación hidrológica está en línea con los objetivos marcados por la Unión Europea, a través de la Directiva Marco de Agua (DMA), que hacen hincapié en la gestión integrada de todas las masas de agua (subterráneas, superficiales, costeras y de transición), en el análisis socio-económico de los distintos usos del agua y en la participación activa de la partes interesadas en el proceso de participación. Ya existen experiencias de planificación y coordinación más intensa a nivel subregional y de subcuencas, como son los Planes Coordinados y las actuaciones coordinadas en el Estuario del Guadalquivir, experiencias que también se han incorporado al proceso actual de planificación hidrológica.

El proceso de planificación previsto por la DMA está en marcha desde ya varios años y ha generado una serie de documentos de diagnóstico y de propuestas.

En este marco general se realiza el trabajo de investigación **“Infraestructuras y políticas del agua y su relación con el territorio del Guadalquivir”** realizado en el seno del Laboratorio de Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Granada fruto de un convenio suscrito entre ésta y la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

Se recoge finalmente una selección de las cartografías temáticas generadas que culminan con una propuesta de ámbitos para la coordinación hidrológico territorial. (Figuras 3.38 y 3.39)

3.2.5.3. Planificación y Gestión Integrada del Agua en la cuenca del Segura

En el mismo marco de referencia europeo y en relación a los objetivos inicialmente propuestos en el Proyecto de Investigación titulado **“Agua, Ingeniería y Territorio: La Transformación de la Cuenca del Río Segura por la Ingeniería Hidráulica”**, fruto del Convenio establecido entre el Ministerio de Medio Ambiente y la Universidad de Granada en su Área de Urbanismo y Ordenación del Territorio, se intentó determinar en este estudio la impli-

cación de la planificación hidrológica y de la ingeniería hidráulica en la transformación territorial de la Cuenca del Segura, mostrando la dimensión territorial de ambas, y estableciéndose criterios concretos para avanzar hacia una planificación integrada.

La necesidad de una relación adecuada entre la planificación hidrológica y la territorial es un principio reconocido y demandado desde hace años, también asumido por la administración hidráulica (PHCS, 1998). Reclamándose insistentemente, por otro lado, una correcta planificación territorial y urbanística, de forma que el crecimiento y el desarrollo no vayan por delante de la disponibilidad de los recursos hídricos o de la capacidad de su depuración una vez utilizados (Morales, 2001-2005; González, 2005; Greenpeace, 2007).

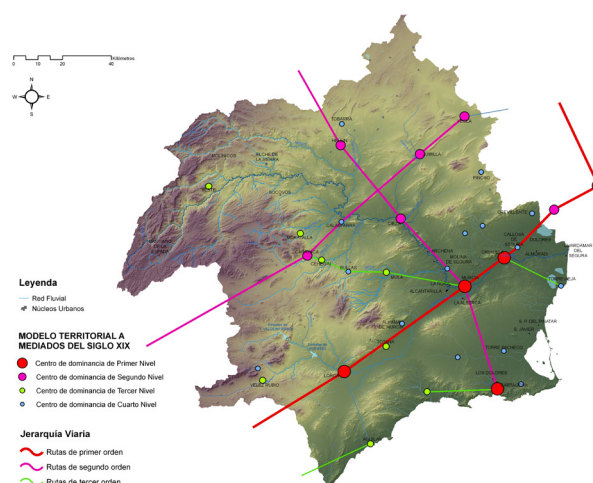
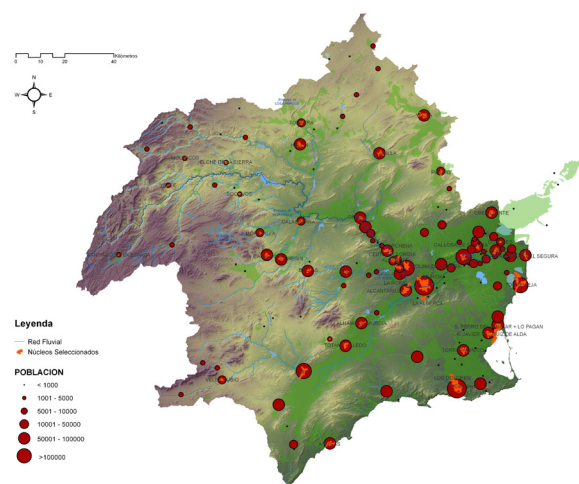


FIGURA 3.40. Caracterización de los núcleos de población

FIGURA 3.41. Modelo territorial a mediados del siglo XIX. Rutas

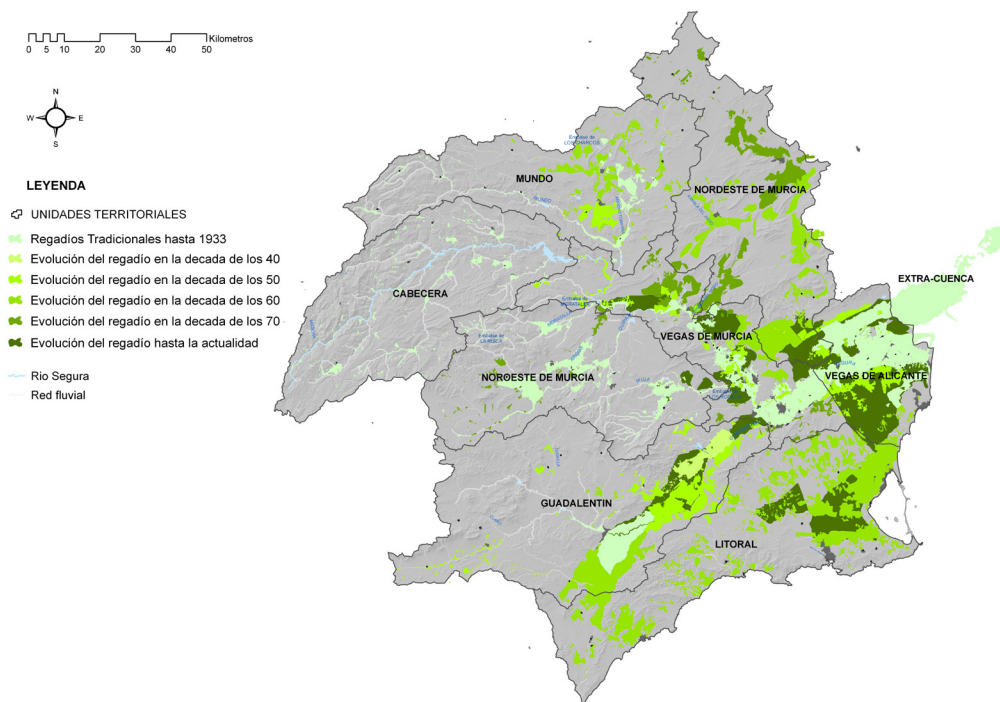
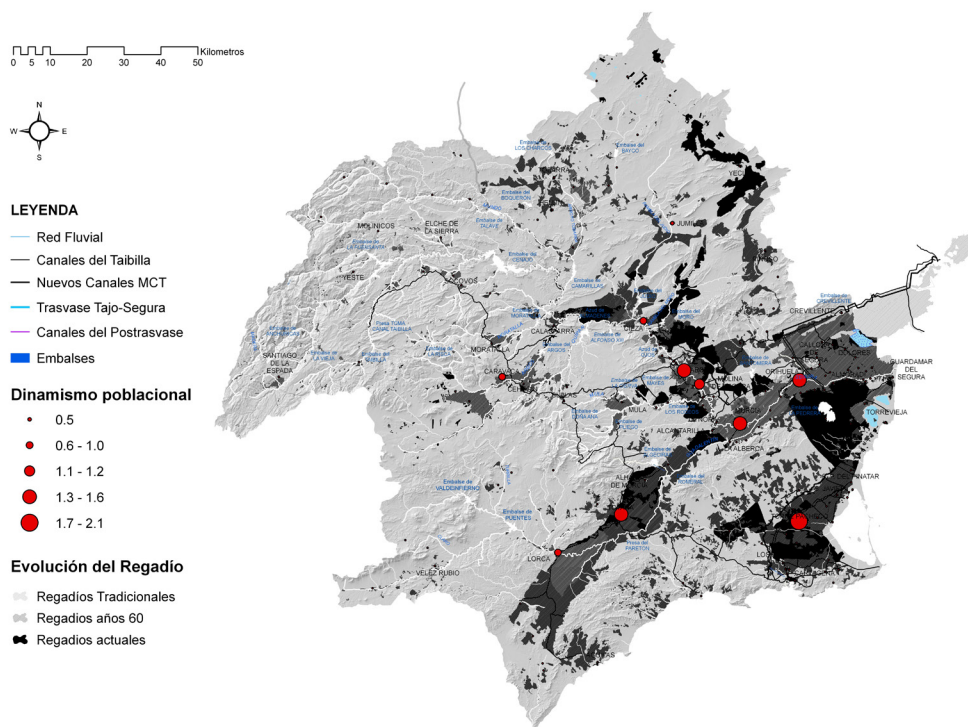


FIGURA 3.42. Dinámica poblacional y evolución de la superficie regada en la cuenca del Segura. Elaboración propia.

FIGURA 3.43. Evolución del regadío según unidades territoriales. Elaboración propia.

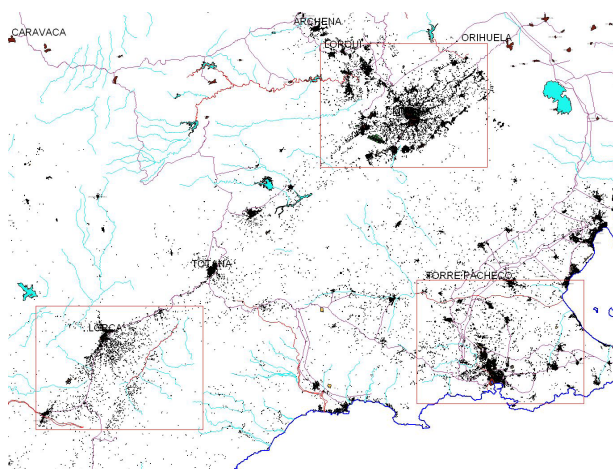
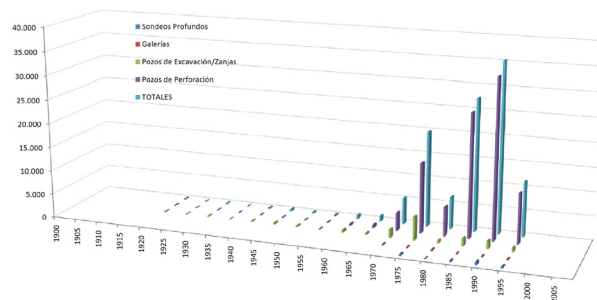
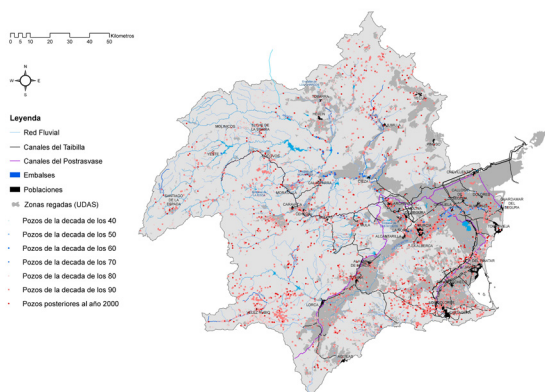


FIGURA 3.44. Evolución de pozos. Elaboración propia.

FIGURA 3.45. Gráfica de la dinamica anterior.

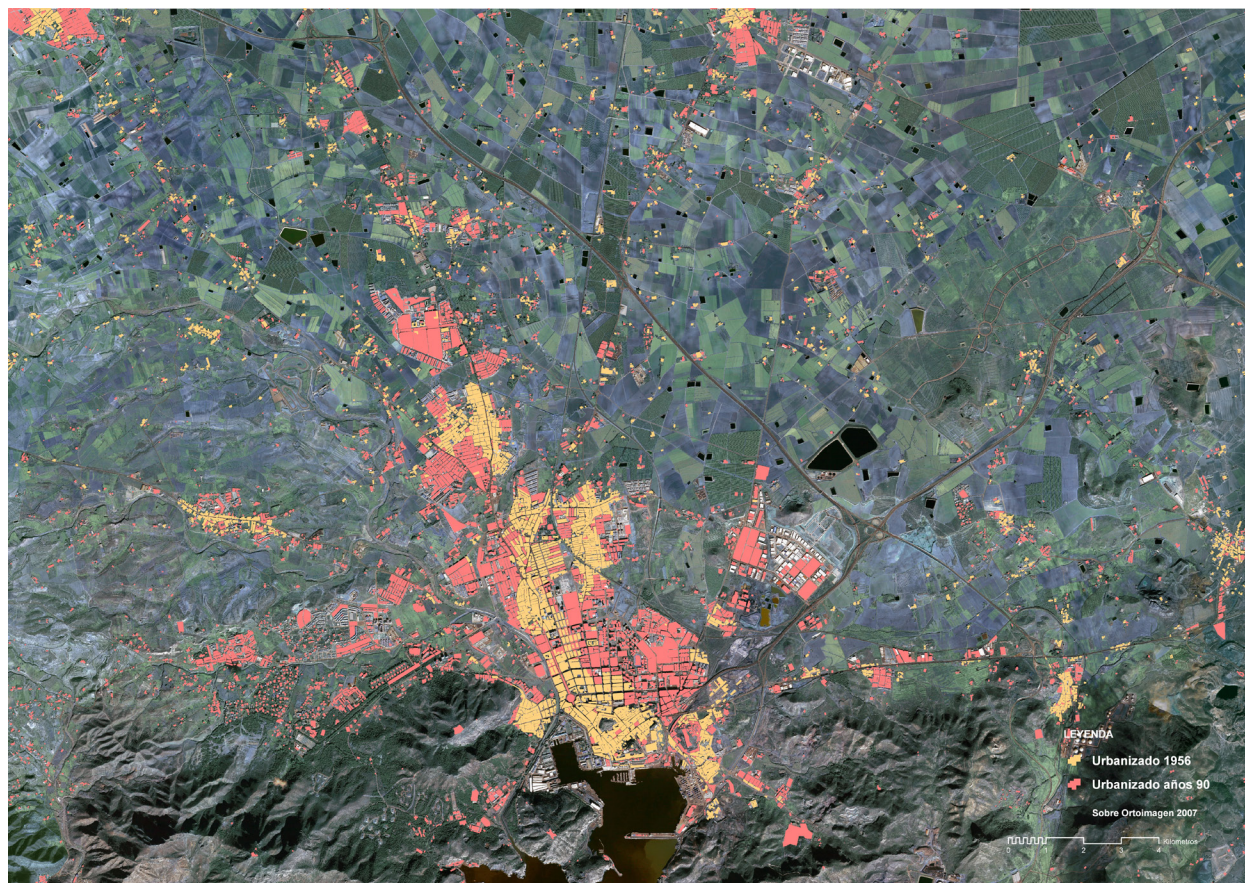
FIGURA 3.46. Mapa base de ámbitos metropolitanos.

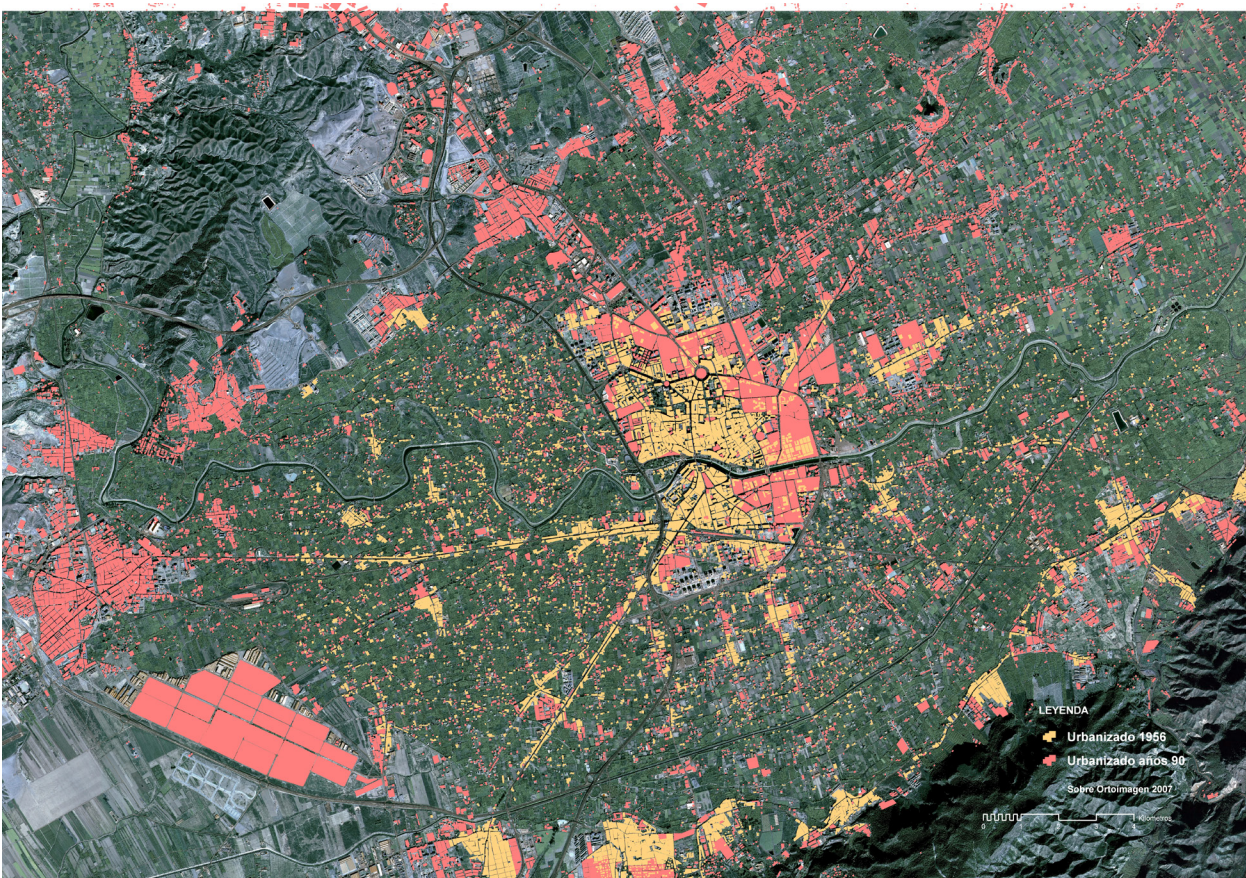
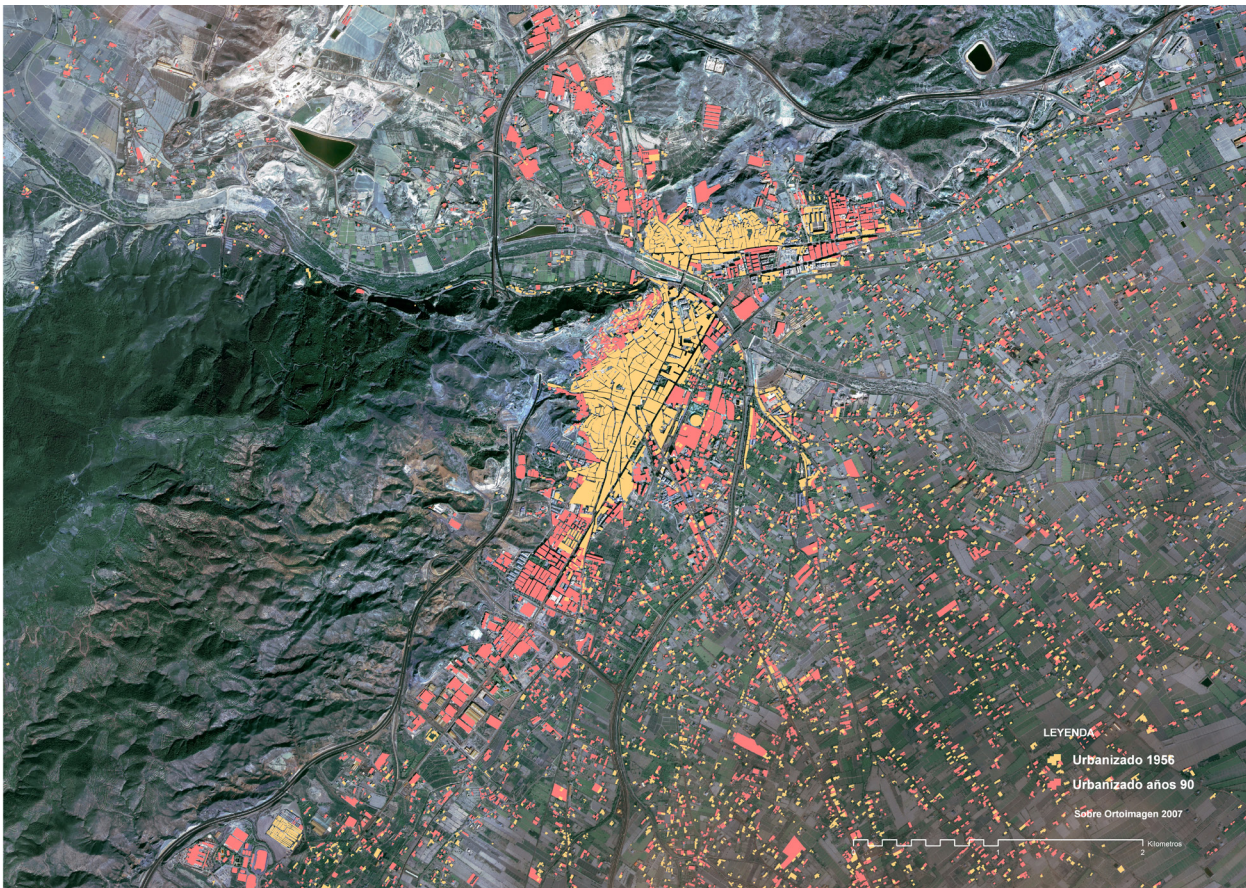
FIGURA 3.47. Crecimiento urbano de Cartagena sobre imagen Quickbird. Elaboración propia.

(página siguiente)

FIGURA 3.48. Crecimiento urbano de Lorca sobre imagen Quickbird. Elaboración propia.

FIGURA 3.49. crecimiento Urbano de Murcia sobre imagen Quickbird. Elaboración propia.





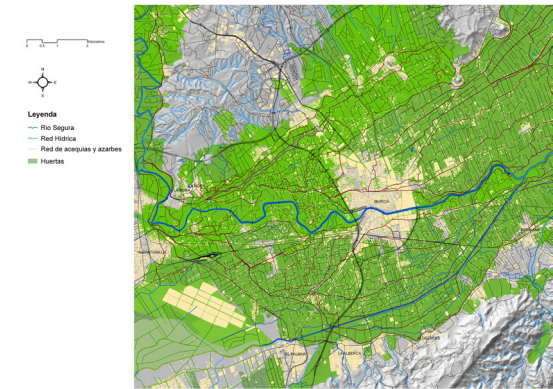
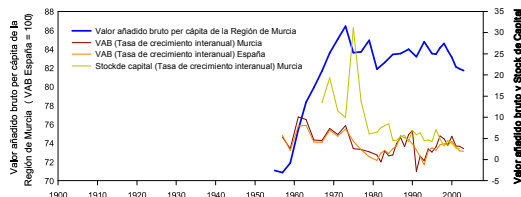
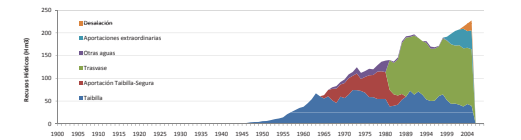
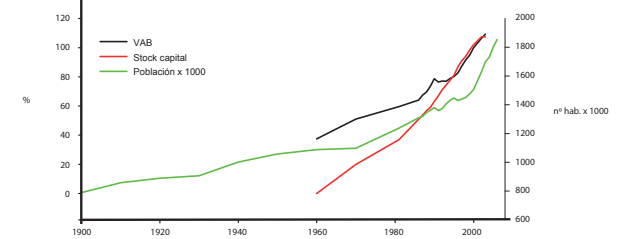
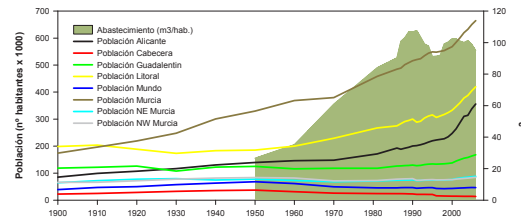
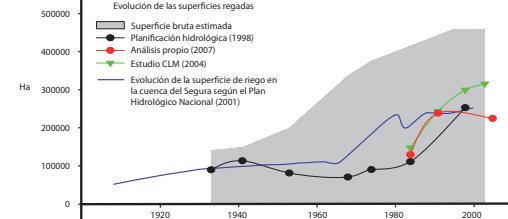
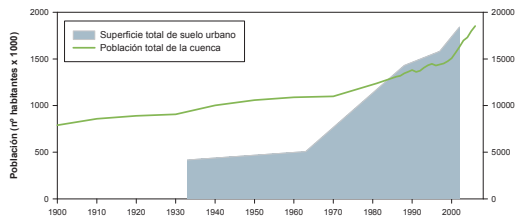
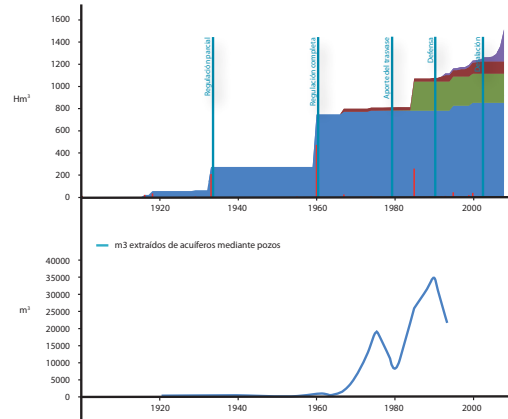
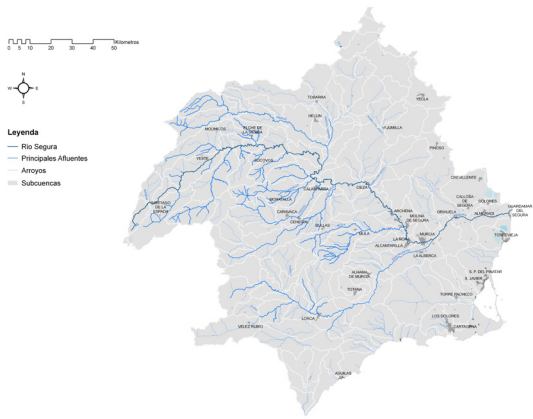
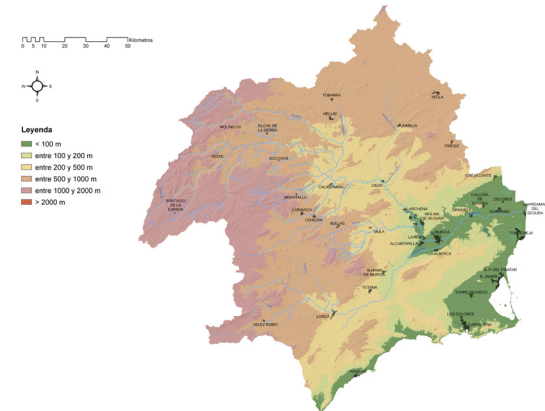


FIGURA 3.50. Red Hidrográfica en la Cuenca del segura. Elaboración propia.

FIGURA 3.51. y 3.52. Gráficas variadas para la cuantificación de dinámicas territoriales

FIGURA 3.53. Detalle de superficie en regadío sobre Mde.

FIGURA 3.54. Hipsometría de la cuenca del segura. Elaboración propia.



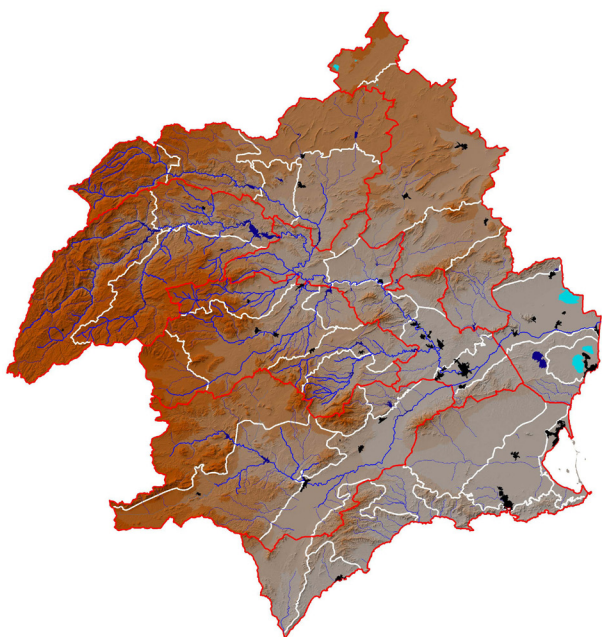


FIGURA 3.55. Regiones hidroecológicas en la cuenca del Segura. Elaboración propia.

FIGURA 3.56. Unidades paisajísticas para el reconocimiento de los paisajes del agua. Elaboración propia.

Esta planificación y gestión integrada del agua necesita aunar la gestión del Medio Natural o Medio Físico que condiciona el acceso al agua y su calidad, y la del Medio Humano, formado por los aprovechamientos hidráulicos (infraestructuras) y las actividades humanas (demandas), que determinan la utilización del agua y el desarrollo territorial asociado. (Grindlay et al. 2007)

Así, estas variables deben integrarse en los tres estadios que componen el proceso de la Planificación y Gestión Integrada del Agua y que según Le Goulven (2005) pueden definirse como:

- La Planificación, Previsión o Gestión estratégica, que consiste en la ordenación de los usos del agua y la definición de escenarios de evolución de las demandas.
- La Gestión operacional, que trata la gestión de las infraestructuras, las demandas y el medio físico.
- y el Control, que trata de analizar la progresiva satisfacción de los objetivos. Para ello debe controlarse la adaptación, la fiabilidad y la vulnerabilidad del modelo ante los posibles cambios.

Las cartografías y gráficas elaboradas en este estudio (Figuras 3.40 a 3.54) reflejan la transformación espacial de la cuenca, su desarrollo infraestructural hidráulico y su relación con la evolución de las superficies de regadío y de suelo urbano. Además se muestran los resultados del reconocimiento de los paisajes del agua para la definición de regiones hidroecológicas y unidades paisajísticas (Figuras 3.55 y 3.56).

Su delimitación se realizó a partir de la superposición de varias capas de información previa y convenientemente reclasificadas (clinometría, hipsometría, subcuencas de drenaje superficial, zonas protegidas, usos del suelo, lugares de interés comunitario, evapotranspiración potencial, precipitación...) y mediante agregación de subcuencas.

3.3. La planificación del transporte y el análisis de redes

La planificación del transporte ha ido cambiando de enfoque en el último medio siglo, incorporando una creciente preocupación territorial y ambiental (Gutiérrez, 2007).

Frente a la planificación orientada hacia el desarrollo económico, que era el enfoque dominante en los años 60 y 70, en los 80 aparece en primer plano el objetivo del desarrollo regional equilibrado (con una mayor preocupación ambiental) y, después, en los 90, el objetivo del desarrollo sostenible (Izquierdo, 1994).

Este se basa en tres elementos que integran los enfoques anteriores y que sitúa en el mismo nivel: **la dimensión económica, la social y la ambiental** realizándose el análisis de estos tres elementos sin olvidar la perspectiva territorial.

Es bien conocida la relación existente entre infraestructuras de transporte, accesibilidad y desarrollo regional (Vickerman et al, 1999). Las economías en la actualidad son cada vez más interdependientes y las interacciones entre redes (viajeros, mercancías, e información) permiten integrar las economías locales entre sí y en la economía global (Gutiérrez, 2007). La mejora de las redes produce una reducción de los costes de interacción que incide positivamente sobre la competitividad del sistema económico y la aparición de los beneficios de la especialización y las economías de escala (Forslund et al, 1995).

Desde una perspectiva regional es claro que la accesibilidad influirá sobre la localización de las actividades en el espacio, como han puesto de manifiesto muchos autores en diversos modelos teóricos de localización (Weber, 1909; Chistaller, 1933; Lösch, 1968; Bunge, 1973, etc.) recogidos en parte por Potrykoski et al, (1984).

La segunda componente de la movilidad sostenible es la social. Las infraestructuras de transporte permiten que la población pueda acceder a los servicios, al empleo, al

ocio, creando disparidades o desventajas a la población localizada en ámbitos rurales alejados de estas redes de comunicación. Esta discriminación es también acusada por ciertos sectores de la sociedad que no disponen de vehículo privado (niños, ancianos o población con bajo nivel de renta), por lo que el acceso a un transporte público eficiente se hace objetivo prioritario de esta sostenibilidad.

En tercer lugar está la componente ambiental. Si en los años noventa esta preocupación se expresa fundamentalmente en medidas para minimizar el impacto ambiental, en la actualidad se llevan a cabo políticas que persiguen modificar los actuales equilibrios entre modos de transporte, para favorecer los que ambientalmente son más aceptables.

En el marco del concepto de movilidad sostenible, en los últimos años se ha pasado del tradicional enfoque *forecasting* (prever para proveer) en el que la oferta debe adecuarse simplemente a las tendencias de la demanda, al actual enfoque *backasting* en el que se prima la consecución de un escenario deseable y posible de movilidad sostenible, mediante la reorientación de la demanda, ante los criterios económicos.

3.3.1. Las redes de transporte.

Se podría decir de forma general que una red está formada por un conjunto de elementos lineales interconectados, a través de los cuales es posible el movimiento de recursos de acuerdo con ciertas condiciones o restricciones (Gutiérrez, 2007).

El análisis de las redes de transporte (carreteras, ferrocarriles, metro, autobuses, redes peatonales...) permiten identificar espacialmente los cambios territoriales derivados del llamado efecto red.

Así, una mejora en un elemento de una red produce efectos positivos en otros muchos elementos de la red, la construcción de una nueva vía de comunicación entre dos núcleos cercanos afecta no solo a la facilidad de comunicación entre ellos, sino también a muchas otras poblaciones que utilizarán ese enlace en sus relaciones mutuas. La evaluación de un proyecto o plan de infraestructura de transporte no debe limitarse, por tanto, únicamente al territorio directamente afectado.

3.3.2. La modelización de las redes. (Network analyst)

La representación gráfica, la informática y la modelización de las redes y su evaluación, planteaban problemas delicados a finales de los años ochenta, como reflejaba G. Dupuy en su *Urbanismo de las Redes*. Su modelo basado en la teoría de grafos lo consideraba adecuado en lo que respecta a la propia red, pero insuficiente para tomar en consideración su relación con el espacio urbano “ordinario” al que sirve. (Dupuy, 1991)

En la actualidad, un SIG vectorial es capaz de representar adecuadamente una red, entendida como sistema interconectado de elementos lineales (arcos y nodos), y simular el movimiento de recursos sobre la misma, ya sea a escala urbana o en un ámbito territorial más extenso. La posibilidad de trabajar con objetos relacionados topológicamente junto a las funcionalidades propias del análisis de redes como el cálculo de caminos mínimos (routing) o el análisis de áreas de influencia de centros de servicio (allocate), convierten a los SIG en herramientas clave de análisis espacial y de apoyo a las decisiones.

La planificación y gestión de redes de infraestructuras básicas, tales como saneamiento y distribución de agua, gas, redes eléctricas o telefónicas, más conocidas como AM/FM (Automated Mapping and Facilities Management), se benefician claramente de las características de los SIG, ya que necesitan disponer de una cartografía muy precisa y de una base de datos asociada con la información alfanumérica de los elementos de la red. Se utilizan para análisis de mercados, trazado de nuevas líneas, localización de averías...

Actualmente la gran mayoría de las empresas de gestión de redes cuentan con un software propio, mientras que en ámbitos más académicos o de investigación se manejan aplicaciones muy especializadas que sin embargo posibilitan la importación y exportación hacia SIG comerciales más estandarizados (es el caso de InfoWorks de Wallinford Software o el simulador Epanet de la Agencia para la Protección del Medio Ambiente de EEUU (USEPA)). También se desarrollan aplicaciones especializadas o extensiones para SIG comerciales como la extensión GIS-red para ArcView 3.2.

Las imágenes siguientes (Figura 3.58) muestran la implementación de un modelo hidráulico de red separativa en el barrio del Albaicín en Granada, realizado bajo el entorno de ArcGis v9.0 y modelizado con InfoWorks CS v6.0. Este estudio, premiado en el certamen nacional Uralita 2000, proponía una red separativa de aguas pluviales que apoyándose en los aljibes existentes servía de contención de caudales. El recurso así retenido era reutilizado para la regeneración ambiental del barrio. Las siguientes figuras ilustran el modelo hidráulico obtenido y el entorno de trabajo de InfoWorks.

En el campo de la investigación de nuevas técnicas para el análisis de las relaciones morfológicas entre los componentes básicos de cualquier red, arcos y nodos, merece la pena citar las aportaciones del Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA) de la University College of London. Su coordinador, Michael Batty presentó en 2005 el proyecto AJAX (Accessibility Analysis of Junctions and Axial lines), como una nueva teoría y un nuevo software de código abierto y descargable desde el enlace:

<http://www.casa.ucl.ac.uk/software/ajax.asp>

Las relaciones entre los nodos (cruces) en función de los arcos (calles), y las relaciones entre las calles en función de los cruces permiten dos aproximaciones complementarias en los análisis de morfología urbana (Figura 3.57). Imágenes que representan medidas de integración y accesibilidad dentro de una red de calles y cruces en

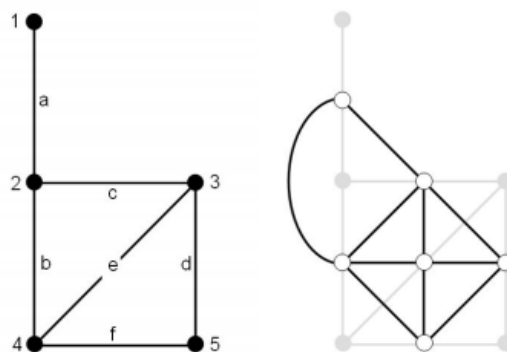


FIGURA 3.57. Relaciones entre calles y cruces según Batty.

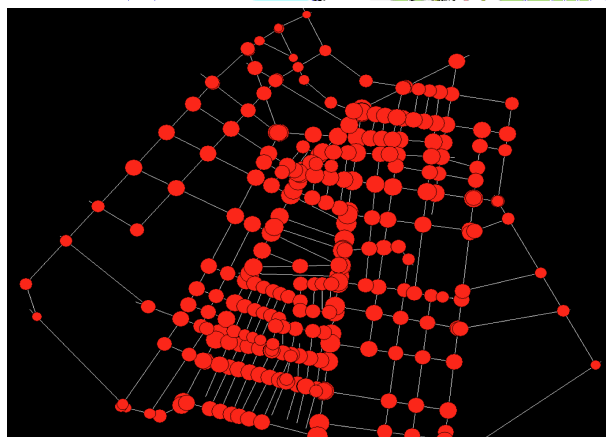
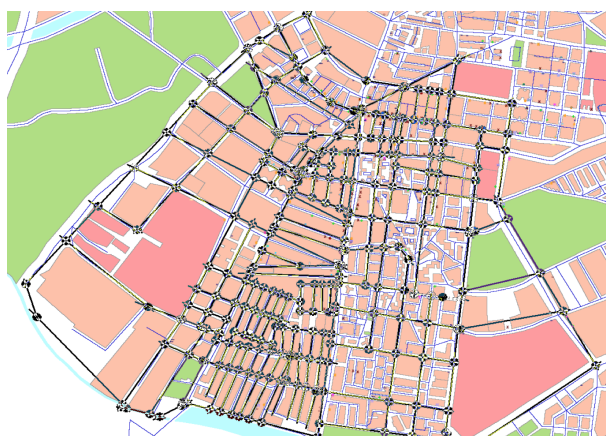
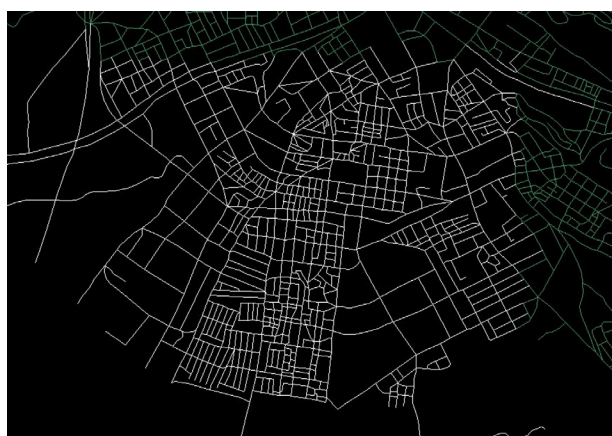
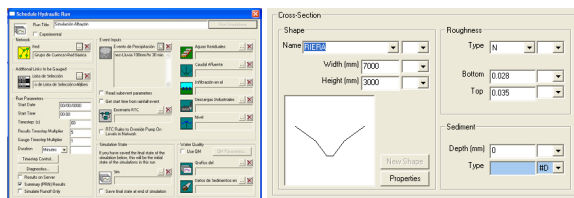
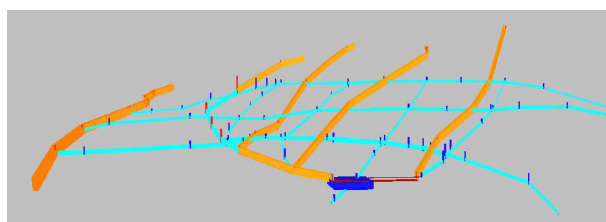
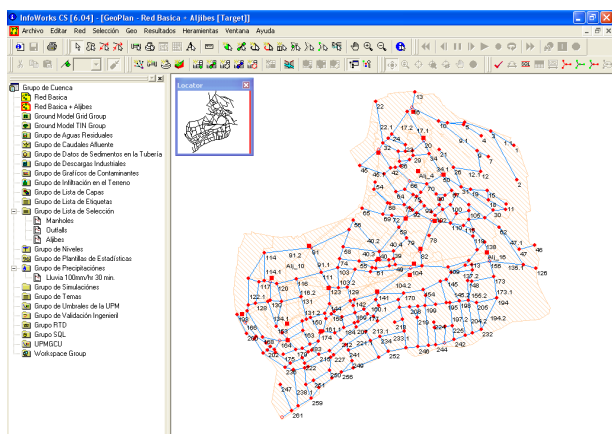
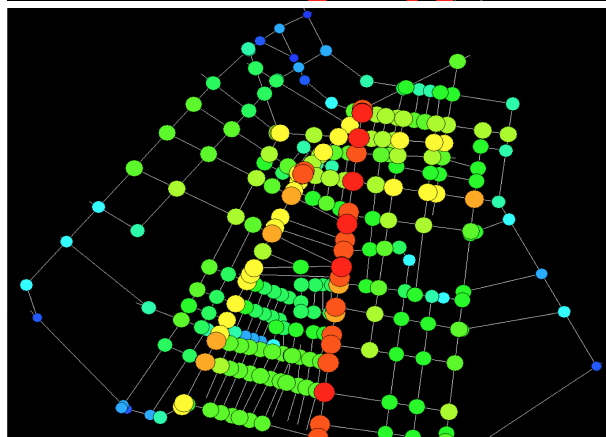


FIGURA 3.58. Modelo de la red de calles del Albaicín (Granada).
Infoworks

FIGURA 3.59. Aplicación del software AJAX(CASA) al barrio del Zaidín (Granada)



un barrio granadino se presentan en la figura 3.58.

3.3.3. Cálculo de caminos mínimos y áreas de influencia.

Las funcionalidades más populares dentro del análisis de redes son el cálculo de caminos mínimos, (ya sea de acuerdo con un orden prefijado de paradas u optimizando el orden de visita de estas), y el análisis de áreas de influencia de centros de servicio.

Conceptualmente se trata de encontrar el camino de mínima impedancia entre distintos puntos de la red (Figura 3.60). Dependiendo de cuantos puntos sean considerados en origen, en destino o incluso intermedios, resultarán funcionalidades distintas:

Para realizar un análisis de caminos mínimos (óptimos) se le debe indicar al sistema cuál es la variable de impedancia de arco que se quiere utilizar, si se van a utilizar impedancias de nodo y cuáles son los puntos de origen y destino de la ruta. Si se imponen paradas intermedias, se puede calcular el camino óptimo de acuerdo a un orden prefijado o dejar al sistema que busque la solución que minimice el movimiento en toda la ruta (problema conocido como el del viajante de comercio).

Otro análisis sería aquel en el que no se conociese previamente el destino de la ruta, por ejemplo, en el caso de un accidente en el que la ruta señale el hospital más próximo. Un último caso sería aquel en el que se necesite barrer toda la red (camiones de recogida de residuos, carteros...)

La áreas de influencia de centros de servicio (ciudades, equipamientos, empresas...) pueden estimarse fácilmente a partir de distancias euclidianas mediante la generación de los polígonos de Thiessen (Figuras 3.61 y 3.62). Se trata de generar polígonos a partir de un conjunto de puntos, de tal forma que los lados de los polígonos sean equidistantes con respecto a los puntos vecinos.

La solución se alcanza mediante un procedimiento geométrico. En primer lugar se genera una triangulación Delaunay a partir del conjunto de puntos. La circunferencia circunscrita no contiene ningún punto en su interior. Los centros de las circunferencias circunscritas a los triángulos de Delaunay constituyen los vértices de los polígonos de Thiessen. Los segmentos que unen esos vértices, trazados perpendicularmente a los lados de los triángulos, constituyen los lados de dichos polígonos.

FIGURA 3.60. Camino mínimo en la ciudad de Granada.



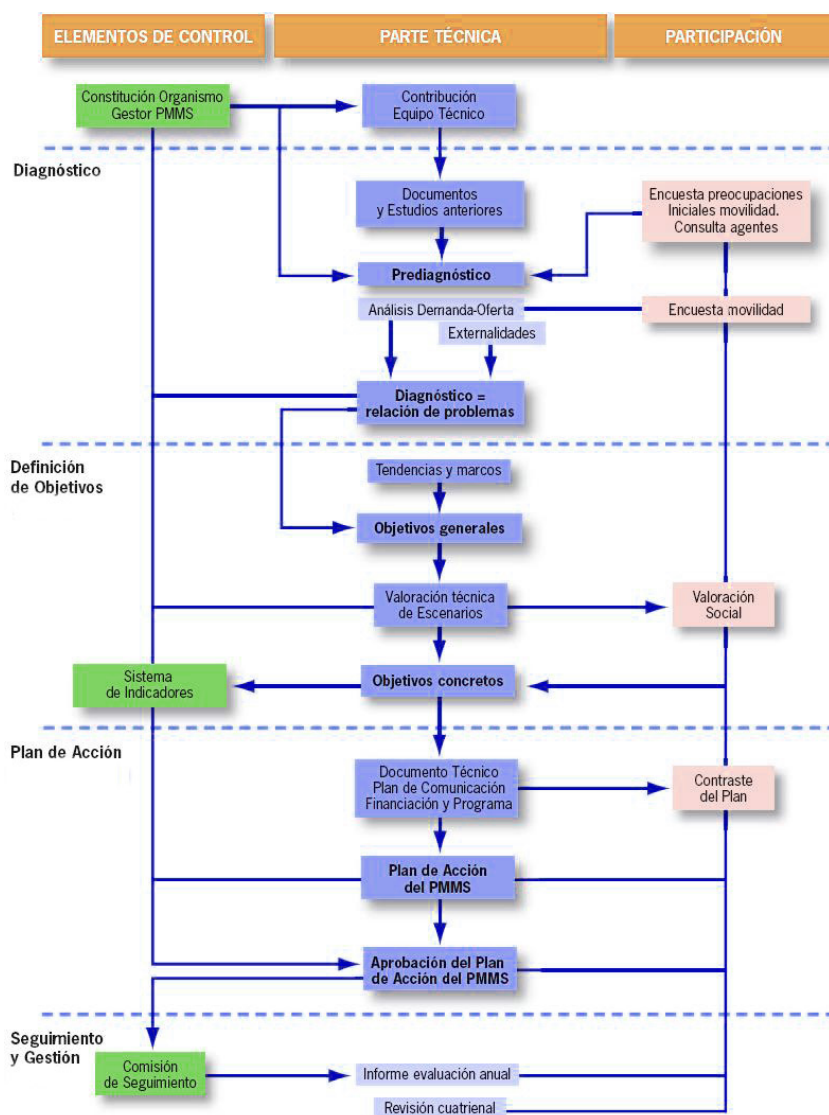
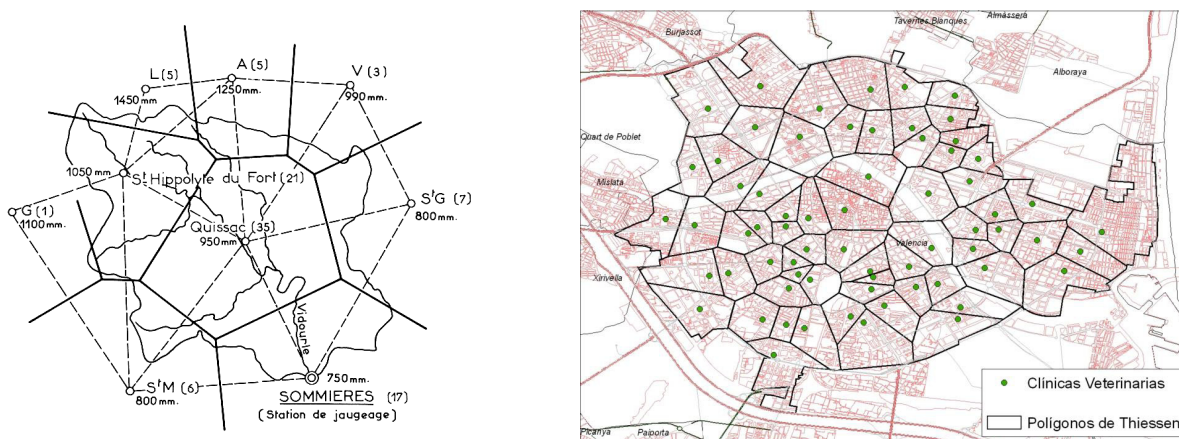


FIGURA 3.61. y 3.62. Generación de los polígonos de Thiessen.

FIGURA 3.63. Metodología de realización de un Plan de Movilidad urbana sostenible (PMUS)

3.3.4. La modelización en la planificación del transporte

3.3.4.1. La modelización en los planes de movilidad urbana sostenible.

Un Plan de Movilidad Sostenible, PMUS, es un conjunto de actuaciones que tienen como objetivo la implantación de formas de desplazamiento más sostenibles (a pie, en bicicleta y en transporte público) dentro de una ciudad; es decir, de modos de transporte que hagan compatibles crecimiento económico, cohesión social y defensa del medio ambiente, garantizando, de esta forma, una mejor calidad de vida para los ciudadanos.

La elaboración de un plan de Movilidad urbana sostenible requiere una metodología de participación y concienciación social, información y educación por parte de las autoridades locales, análisis detallados de la situación inicial y de las propuestas, implantación progresiva de las medidas con evaluación de resultados, y realizaciones piloto, educativas y promocionales (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2005)

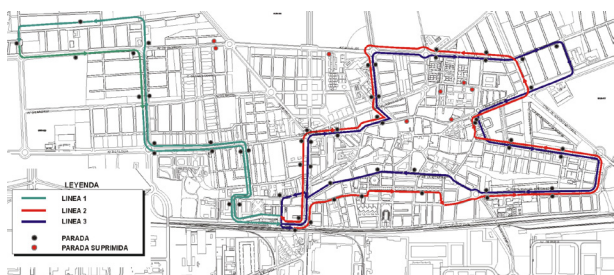


FIGURA 3.64. Itinerarios de transporte público.

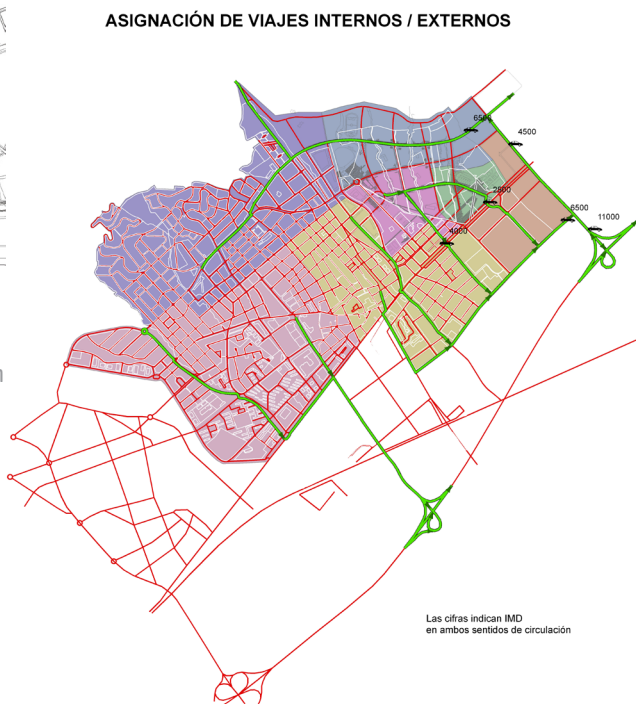
FIGURA 3.65. Asignación de viajes en el proceso de modelización del tráfico

En las fases de Análisis y Diagnóstico, en la caracterización de la movilidad y como instrumento para la formulación de propuestas se suele realizar una modelización del tráfico que permita reproducir simplificadaamente el sistema de movilidad.

Esta modelización consta de las siguientes fases:

- FASE 1: Recogida de Información y encuestas. Zonificación.
- FASE 2: Análisis. Explotación de la Encuesta. Matrices O/D a Matrices G/A
- FASE 3: Proyecciones, escenarios futuros, diagnóstico.
- FASE 4: Propuesta y evaluación

Dentro de la fase de análisis y posteriormente a la explotación de la encuesta y del paso de las matrices O/D a matrices G/A, se realiza físicamente el proceso de modelización.



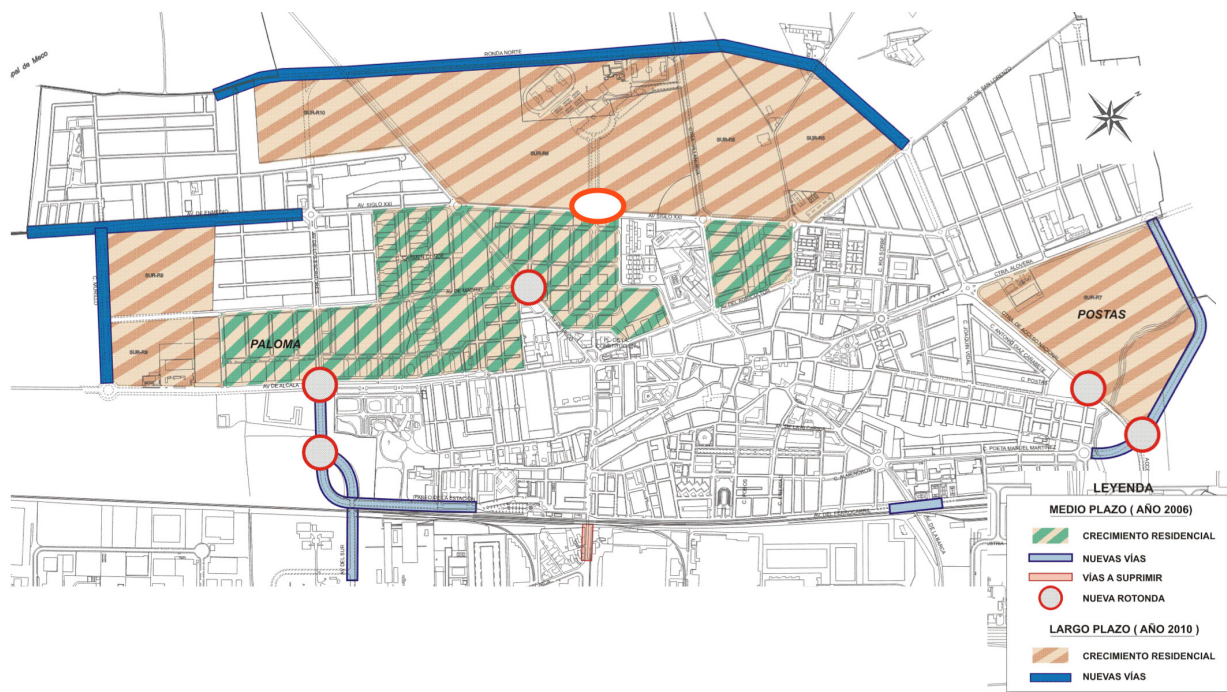
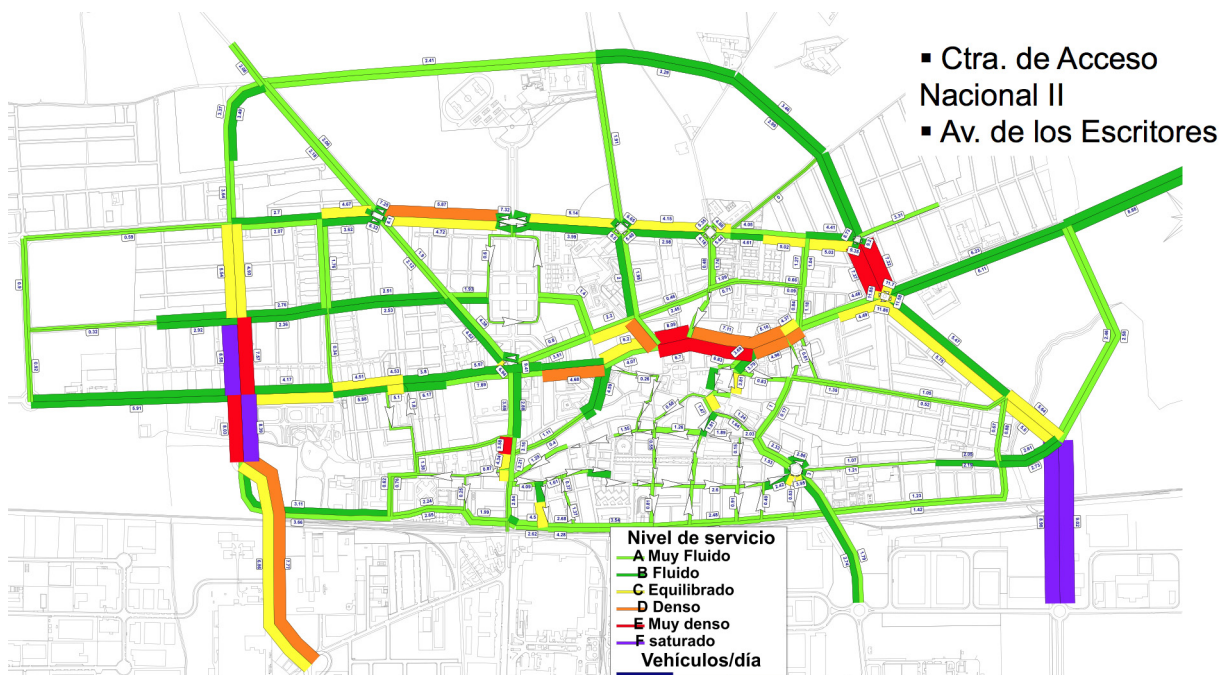


FIGURA 3.66. Nivel de servicio en la modelización del tráfico.

FIGURA 3.67. Crecimientos y nuevas infraestructuras de movilidad.

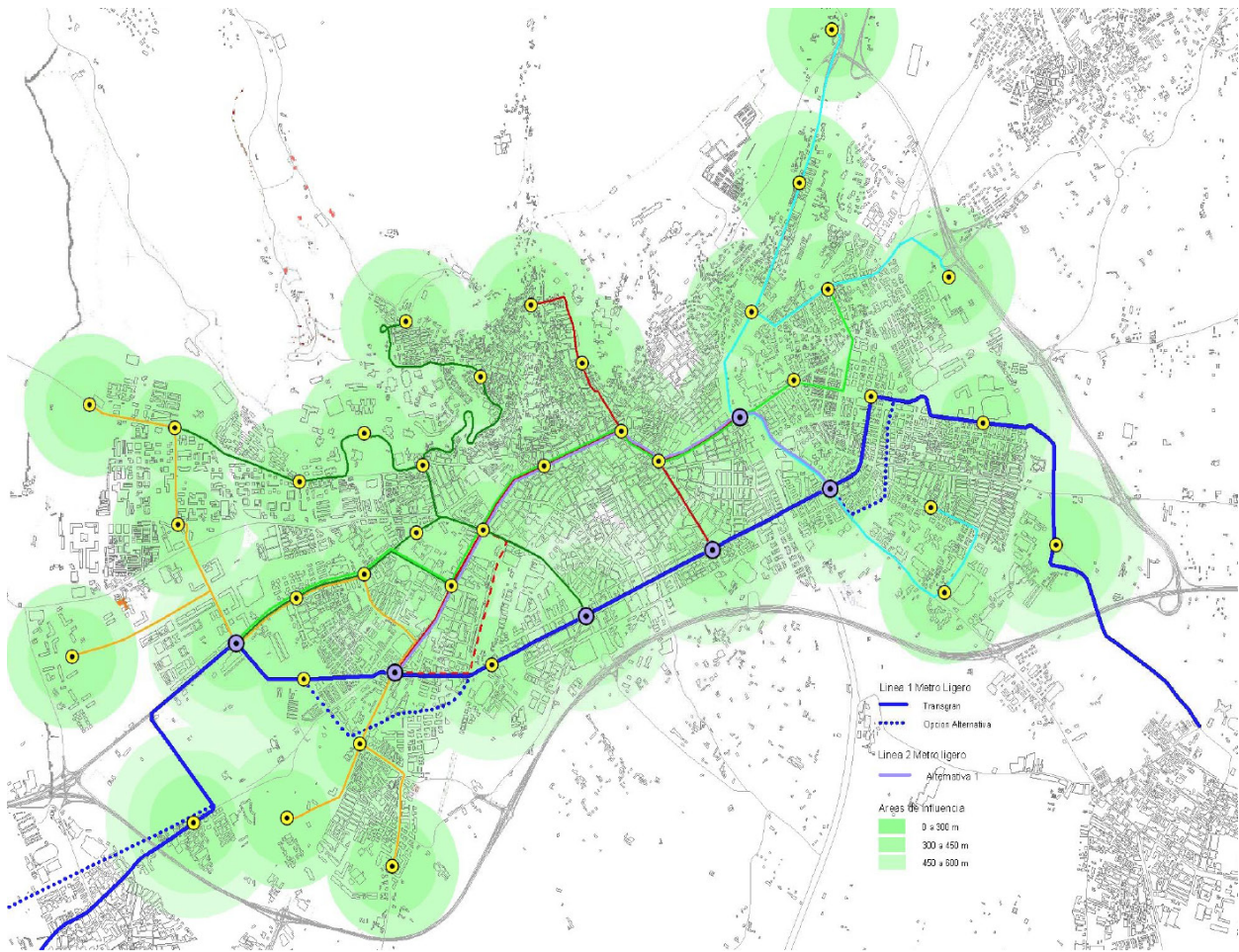


FIGURA 3.68. (Arriba) Cobertura de la propuesta de red de metro ligero y lanzaderas en la ciudad de Granada. Elaboración propia.

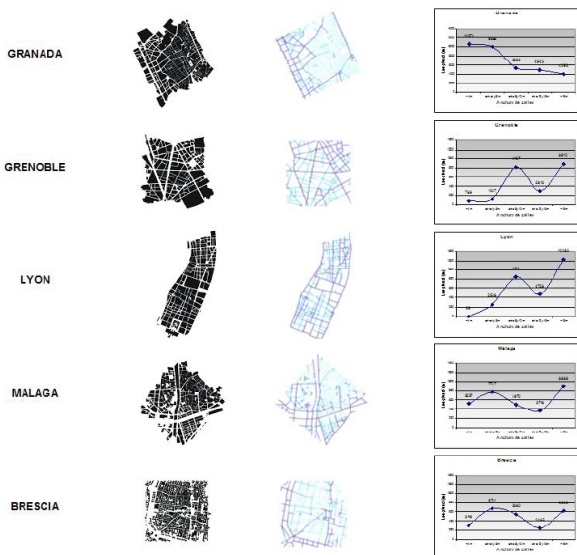
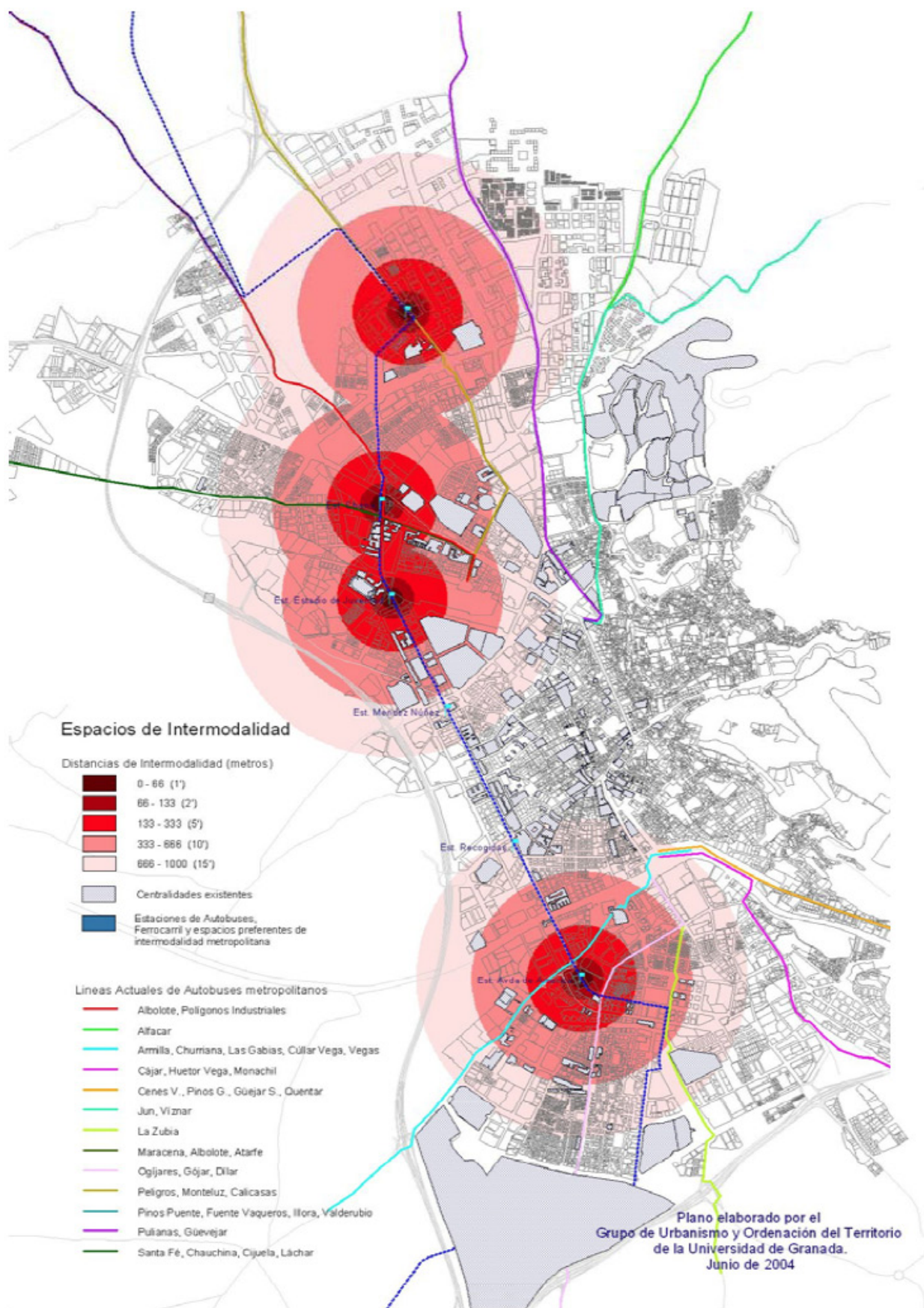


FIGURA 3.69. (Izquierda) Gráficas de la comparativa de anchura de calles en un km cuadrado de ciudad como argumento de decisión soterrado/superficie realizada en cuatro ciudades europeas con metro ligero y en Granada. Elaboración propia.

FIGURA 3.70. Espacios de Intermodalidad en la propuesta de Línea Norte Sur de metro ligero en Granada. Elaboración propia.



3.3.4.1.1. Análisis de la Oferta de transporte

Se entiende por oferta el conjunto de las infraestructuras y servicios destinados a facilitar la movilidad de las personas y las mercancías, es decir, la red viaria, las redes peatonales y ciclistas, en su caso, las redes y servicios de transporte público, etc.

Consta al menos de un Inventario Vial y de las rutas de transporte público y del estudio de frecuencias de paso del transporte público.

3.3.4.1.2. Análisis de la demanda de Transporte

Por su parte, se entiende por demanda a los usuarios de los distintos medios de transporte, es decir, en principio, a toda la población, con sus características intrínsecas (socio-económicas, culturales, etc.), espaciales (distribución en el territorio) y de movilidad (formas de desplazamiento en el momento del estudio).

Consta de varios estudios:

- Estudios de tránsito
 - Demanda vehicular en intersecciones
 - Flujos vehiculares en corredores
 - Velocidades de marcha y recorrido
- Estudios de transporte
 - Encuestas de movilidad
 - Aforos y encuestas de cordón externo
 - Tiempos de recorrido y demoras en transporte público
 - Ascenso y descenso de pasajeros

3.3.4.1.3. Modelos de demanda de Transporte

Para la asignación de las matrices O/D a las redes de transporte público y transporte privado es necesario normalmente el empleo de herramientas informáticas adhoc, en las que se introducen los grafos que representan las redes de transporte y las matrices de viajes obtenidas en etapas anteriores de análisis, simulando de forma esquemática el funcionamiento del sistema.

Existen numerosos algoritmos de asignación de viajes a la red que deberá elegir un modelador experto con el fin de alcanzar el grado de ajuste adecuado. Los resultados de la asignación en transporte público y en transporte privado son contrastadas con las observaciones realizadas en los trabajos de campo, siguiendo un proceso de reajuste iterativo hasta que los modelos de asignación consigan una aproximación suficiente a la realidad actual, o calibrado del modelo.

Disponer de un modelo de transporte contribuye a la detección de problemas y puntos críticos y sobre todo a la evaluación de las diferentes medidas propuestas para paliarlos, pero constituye una inversión de recursos considerable. Además la utilización y el calibrado de modelos matemáticos es una tarea compleja que requerirá la participación de expertos.

Los modelos de generación y atracción permiten cuantificar los viajes realizados por las personas que residen o desarrollan actividad en una determinada área urbana,

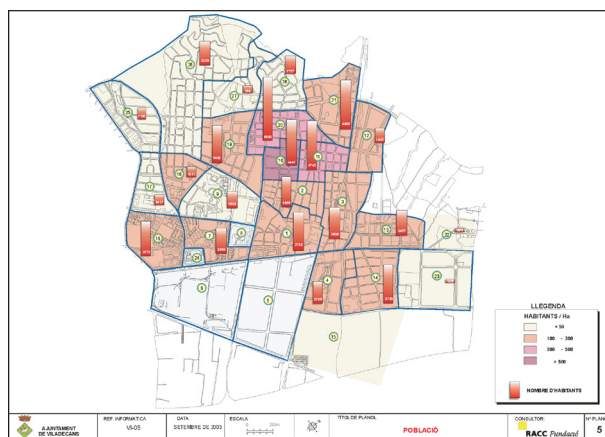
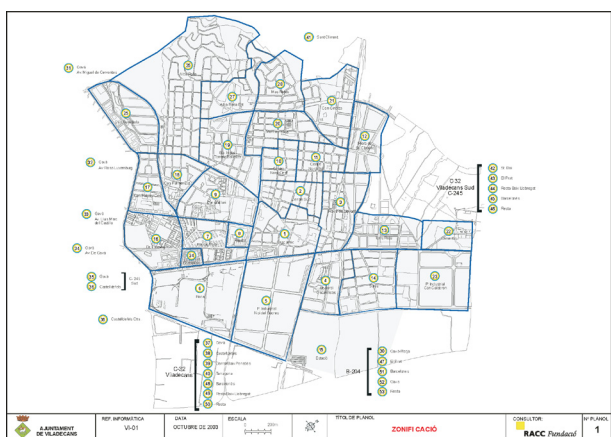


FIGURA 3.71 y 3.72. Zonificación y población por zonas. Primer paso de la modelización. Fuente: RACC y Ayuntamiento de Viladecans

o por los vehículos relacionados con dicha área.

Los modelos de distribución permiten determinar las zonas de origen y destino de los viajes generados.

Los modelos de reparto o división modal determinan la proporción en que los usuarios seleccionan el modo de transporte para la realización de sus viajes.

Factores que influyen en la división modal:

- Características del usuario:
Disponibilidad de automóvil, estructura del hogar, ingresos.
- Características del viaje:
Propósito, longitud y horario del viaje.
- Características del sistema de transporte:
Comodidad, confiabilidad y regularidad, accesibilidad y seguridad

3.3.4.1.4. Comparación de la oferta y la demanda de transporte

La evaluación del sistema de movilidad es fundamentalmente el análisis de la adecuación de la oferta de infraestructuras, ya inventariada y evaluada en el apartado anterior, a la demanda de desplazamientos y aparcamiento.

El análisis de la adecuación oferta-demanda tiene como finalidad comprobar hasta qué punto, en qué medida, la oferta de infraestructuras para la movilidad es acorde con la demanda, tanto desde un punto de vista cuantitativo, como cualitativo. En definitiva se trata de ver:

- La adecuación funcional de cada una de las redes a la demanda, es decir a la disposición espacial de los principales focos de producción y atracción de desplazamientos.
- La adecuación del dimensionado de cada una de las redes de infraestructuras a la demanda.
- La calidad del servicio ofrecido por las diferentes redes y servicios a los usuarios.

La adecuación funcional supone considerar si la disposición espacial de cada una de las redes (de peatones, ciclistas, transporte público, vehículos privados, aparcamiento), con los trazados de sus elementos, el diseño y regulación de sus puntos de encuentro e intercambio

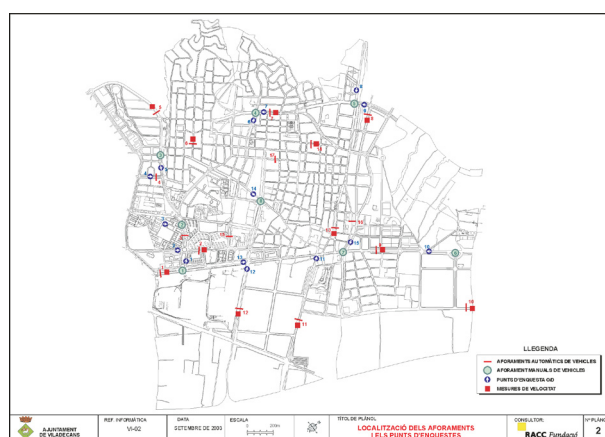
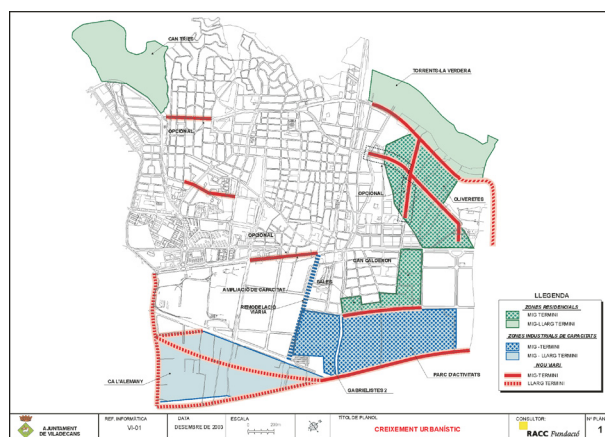


FIGURA 3.73. Nuevos crecimientos residencial e industrial y nuevos viarios propuestos.

FIGURA 3.74. Localización de aforos.

FIGURA 3.75. Nivel de servicio para una de las alternativas propuestas.

Fuente: RACC y Ayuntamiento de Viladecans

con otras redes, etc., es la óptima para proporcionar el servicio más directo y eficiente a los diferentes flujos de demanda.

Dentro de la adecuación funcional es importante comprobar en particular, en qué medida la red rodada dispone de elementos o itinerarios específicos para:

- Encauzar el tráfico de paso, sin mezclarse con el tráfico interno y sin atravesar áreas urbanas.
- Canalizar el tráfico de pesados, sin que suponga una afección significativa a las zonas urbanas y al resto de actividades.

La adecuación dimensional de la oferta a la demanda plantea la cuestión de la capacidad de las redes de infraestructura, como una calidad propia del diseño y de su regulación, así como, desde otro punto de vista, la de sus niveles de congestión. El cálculo de la capacidad de calzadas, aceras o sistemas de transporte público no es una tarea fácil, a pesar de que existen manuales muy sofisticados para ello y sólo resulta rentable obtenerla para el conjunto de la red en ciudades de cierto tamaño, con la ayuda de modelos de tráfico, hasta ahora aplicados sobretodo al movimiento de vehículos y muy excepcionalmente al de peatones.

No obstante, dado que, en vías urbanas, la capacidad de un itinerario viene fijada por la de las intersecciones, que constituyen los puntos débiles del sistema, el estudio del funcionamiento de las más importantes de éstas, de las colas y retrasos que generan, puede ser suficiente para comprobar los problemas de capacidad y el nivel de congestión que padece cada una de las redes en sus principales elementos

En relación a la evaluación de las redes es relevante analizar la distribución de la sección disponible de espacio público en las calles entre aceras, bandas de aparcamiento, carriles reservados y calzadas convencionales, en función de la importancia de la demanda asociada a cada una de ellas.

La adecuación de la calidad del servicio ofrecido podría evaluarse, por ejemplo, analizando la relación entre el grado de calidad-confortabilidad de las infraestructuras (pendientes, trazados, pavimentación, iluminación, etc.), ya inventariado en el análisis de la Oferta, y su

nivel de uso. O referido específicamente a los medios de transporte público, habría que analizar la calidad del servicio en aquellas líneas que tengan una mayor demanda o un mayor potencial de demanda, a fin de valorar posibles mejoras.

Estas mejoras podrán ser tanto de calidad de red (Sistemas de ayuda a la explotación, calzadas exclusivas, prioridad semafórica), como de calidad del servicio (mejoras en su frecuencia, confortabilidad de vehículos y recorridos, sistemas de información en tiempo real, etc.).

El análisis de la adecuación oferta-demanda a estos tres niveles, permite una evaluación de la correspondencia entre oferta y demanda, en cada una de los modos de transporte, así como la detección de los aspectos o elementos conflictivos del conjunto.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- Modelo de Asignación de viajes. Proceso mediante el cual se determinan los itinerarios que seguirán esos viajes.
- Modelización de la red viaria. Jerarquización de la red, centroides y conectores. Sentidos de circulación, giros y prohibiciones. Capacidad y funciones de demora para cada arco. $V=f(I/C)$. Calibración: Aforos y coche flotante. Asignación futura
- Elección de un método de asignación de tráfico (transporte privado). Curvas de velocidad – flujo y costo – flujo. Asignación en redes congestionadas
- Elección de un método de asignación de viajeros (transporte público). Problemas en la asignación del transporte público. La asignación de viajes por tránsito

Para la realización de estos complejos modelos de tráfico se utilizan sistemas de información geográfica expresamente orientados hacia este fin (es el caso de Transcad de la casa comercial Caliper) que incluyen modelos de demanda de tráfico que contemplan las cuatro etapas fundamentales de este proceso: Generación de viajes, distribución de estos, selección modal y asignación de viajes.

Estos sistemas ofrecen la opción de utilizar modelos preexistentes elaborados para otros contextos o calibrar

un modelo según las características del área de estudio.

Otros paquetes comerciales comparten parecidas funcionalidades, como Emme/2, TRIPS, QRSII o PTV Vision, en el campo de la planificación del transporte, TRAF-NET-SIM, AIMSUM2, SIMTRAFFIC en el campo de la simulación o SYNCRHO, CORSIM, CONTRAM en el campo de la regulación de señales semafóricas.

Es interesante destacar el software TRAMOS (Traffic and Transport Analysis, Modelling and Optimization System) desarrollado en la escuela de ingenieros de la universidad de Sevilla, ya que constituye un primer intento por unar, a partir de las redes que sirven de base a un estudio de tráfico, las diferentes aplicaciones necesarias para el análisis de problemas tan diferentes como la construcción de una nueva arteria, la inclusión de un nuevo modo de transporte o el cálculo de un plan de control de tráfico para un evento determinado.

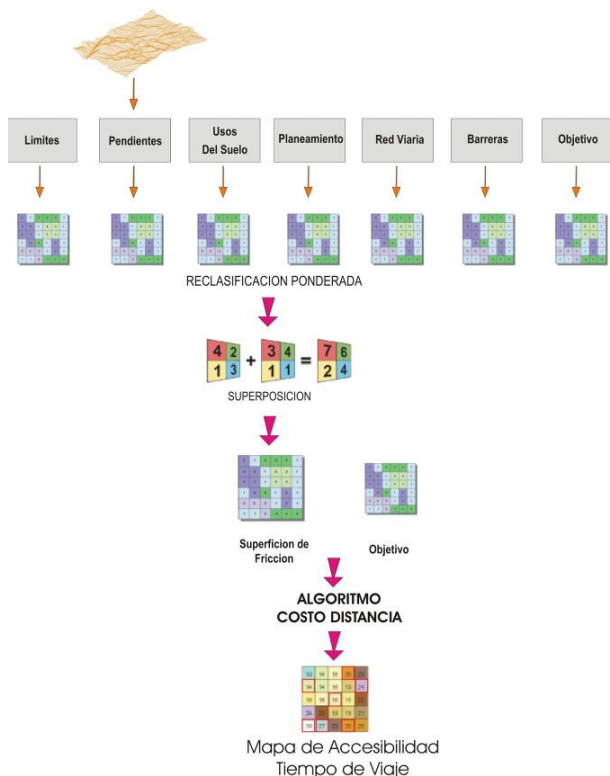


FIGURA 3.76. Esquema metodológico simplificado del modelo de Accesibilidad

3.3.4.2. La modelización de la accesibilidad territorial.

Accesibilidad: *calidad de accesible, de aquello que tiene acceso, de fácil comprensión, inteligible. Hacer inteligible un territorio.*

Como cita Salado (2004), el término accesibilidad, tan frecuentemente utilizado, no tiene ni mucho menos una única y consensuada acepción. Se ha entendido en términos geométricos como “cercañía”, como potencial u “oportunidad relativa de interacción y contacto” (Öberg, 1976, Gregory, 1987 y Jiang et al, 1999), bien sea de tipo económico (Levinson, 1998) o social (Handy et al, 1997) o también como “la facilidad con que un servicio pueda ser alcanzado desde una localización” (Gutierrez et al, 1999).

Se puede admitir que la accesibilidad de la población a los equipamientos es susceptible de dos enfoques complementarios, el locacional o territorial (place accessibility), del que trataremos en este apartado, y el enfoque personal (individual accessibility), en el que tiene un papel relevante la percepción del espacio, la accesibilidad espacio temporal del servicio, el precio del mismo, la evaluación subjetiva en la relación calidad-precio o las posibles restricciones de uso (Salado, 2004).

El concepto de accesibilidad territorial, entendida como la facilidad para alcanzar un punto u objetivo, hace referencia al factor de interacción del territorio, donde las relaciones entre dos puntos aumentan en función de la disminución del coste de desplazamiento entre ellos (Varela 2004).

Es sabido que existe una importante relación entre los niveles de accesibilidad y la distribución de usos, de tal forma que cambios en la accesibilidad implican cambios en la distribución y en la intensidad de los usos actuales, pudiéndose asociar con factores tales como el precio del suelo o la densidad residencial. La accesibilidad se convierte en un elemento esencial para la comprensión de las pautas del desarrollo urbano y metropolitano (García, 2000).

La accesibilidad territorial se relaciona directamente con el concepto de distancia y por lo tanto con el de espacio. Las nociones de proximidad y lejanía ya no se pueden referenciar únicamente a la idea de espacio

absoluto, sino que también a la de espacio relativo. El tiempo, por tanto, se constituye como parámetro fundamental para entender la distancia (Varela 2004).

Para conseguir un modelo de accesibilidad continuo, diferente de los tradicionales indicadores de accesibilidad del modelo vectorial que aíslan el territorio en modelos arco/nodo, se recurre a la aproximación ráster que aunque reduce la precisión geométrica de los elementos, ofrecen mayores capacidades analíticas, fundamentalmente a través del álgebra de mapas (Varela, 2004).

En este mismo trabajo se citan las experiencias de Juliao sobre Lisboa y la región del Valle del Tajo, de Farrow y Nelson en Honduras, de Pablo et al. sobre la red viaria de Alta capacidad en España, y las suyas propias en las comarcas de la provincia de La Coruña, donde se utiliza este modelo de cálculo que permiten determinar el coste acumulado existente en el desplazamiento desde uno o varios puntos tomados como objetivos al resto de puntos de una región.

Más recientemente en el seno del Laboratorio de Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Granada se aplica esta metodología en diferentes ámbitos: En la cuenca del Río Guadalfeo (Molero et al., 2007), en la Aglomeración urbana de Granada (Aguilera, 2008 y 2010) y en su futura segunda circunvalación (Valenzuela et al. 2006), en la A-92 y en la autovía Granada-Badajoz.

Para el cálculo de las distintas medidas de accesibilidad se ha seguido una variación de la metodología propuesta por Farrow y Nelson (2001) y que tiene su origen en los estudios de Ian McHarg sobre planificación territorial de finales de los años 60 (McHarg, 2000). Las técnicas utilizadas de reclasificación y superposición de mapas temáticos, para generar nuevas variables o modelización cartográfica, se consideran las operaciones más características de los modernos S.I.G., además de unas potentes herramientas de análisis (Gómez y Barredo, 2005).

El presente modelo se ha realizado bajo el entorno de trabajo del software ArcGis 9.3 y de su módulo Spatial Analyst que permite trabajar tanto con datos de tipo vectorial como raster. En la figura 3.76 se ilustra el diagrama metodológico aplicado.

3.3.4.2.1. Generación de la Superficie de fricción.

Así, se considera el territorio como una matriz de elementos discretos o malla asignándole a cada celda o píxel un valor que representa la resistencia al desplazamiento en términos de tiempo y que se denomina superficie de fricción. Para determinar el valor de cada cuadrícula, es decir, la impedancia o coste que supone cruzarla, se tienen en cuenta diferentes características del territorio, como la red viaria como elemento fundamental, ríos, áreas urbanas, y barreras.

La velocidad de viaje “estándar” asignada a cada píxel se transforma, mediante una reclasificación, para expresarla en términos de tiempo requerido en cruzar un metro de territorio. Este criterio ha sido utilizado anteriormente en los trabajos de Farrow et al. (2001), Bosque et al. (1999), Valenzuela et al. (2006) y Molero et al. (2007).

El valor así estimado para caminos y celdas sin viario es posteriormente modificado mediante un coeficiente multiplicativo que recoge la pendiente del terreno (a las menores de 3% se le asigna el coeficiente de valor 1, entre 3% y 7%, el valor 2 y más de 7% el valor 3) con objeto de tener en cuenta, de forma simplificada, la impedancia que aporta la pendiente en los desplazamientos más lentos. En este apartado es interesante citar las aportaciones de Fitzpatrick et al. (2000) para estimar el efecto de la pendiente y la curvatura sobre la velocidad de desplazamiento.

Cabe destacar la introducción en el modelo del efecto barrera que supone el trazado de la autovía, permitiendo el acceso a ella únicamente mediante sus enlaces o nudos, mediante líneas paralelas de gran impedancia y la creación a ambos lados de su traza de sendas vías de servicio que dan continuidad a la red y que actúan como colectoras de todas estas vías que quedan interrumpidas hacia los enlaces. Este mismo efecto barrera atiende con igual consideración a las superficies de agua (ríos y embalses).

3.3.4.2.2. El algoritmo Costo-Distancia

Sobre la superficie generada o superficie de fricción y seleccionando previamente unos polos u objetivos, se aplica el algoritmo costo-distancia (cost-distance), que permite calcular para cada celda el menor costo acu-

mulado, en términos de tiempo, hasta el objetivo más cercano (ESRI 2004). El resultado es una superficie continua donde a cada celda se le ha asignado el tiempo en alcanzar dicho objetivo. Esta malla es posteriormente reclasificada para la obtención de isocronas.

3.3.4.2.3. La elección del objetivo. Indicadores de accesibilidad.

Los indicadores de accesibilidad permiten medir los beneficios, para la población y las empresas de una región, derivados de un proyecto o plan de infraestructuras de transporte. Existe una gran variedad de indicadores para medir la accesibilidad. Pooler (1995) subraya que el elemento común en el uso de indicadores de accesibilidad es la localización de lugares o centros de atracción, en relación unos con los otros o con elementos exógenos.

La elección del objetivo u objetivos será por tanto el que defina el tipo de indicador de accesibilidad.

El más sencillo se basa en el cálculo del coste de acceso, en nuestro caso en términos de tiempo, a un solo centro. Por ejemplo se puede calcular el coste de acceso a la ciudad más importante de la región o a la más próxima a cada nodo. En la evaluación de un proyecto o plan, la comparación del escenario sin y con la intervención nos mostrará los beneficios producidos.

El plan estratégico de Infraestructuras y Transporte 2005-2020 (PEIT) utiliza tres indicadores de accesibilidad, algo más complejos, para evaluar las actuaciones previstas en materia de carreteras y ferrocarriles, (ver en Gutiérrez, 2007) :

-Indicador de localización:

Calcula el tiempo en alcanzar los distintos centroides provinciales desde cada uno de los nodos de la red. Este tiempo es ponderado por la población de los centroides de destino, de forma que se da más importancia a estar bien conectado con las provincias más pobladas. Destaca los contrastes centro-periferia. Atiende por tanto a un enfoque locacional.

-Indicador de potencial:

Adopta una formulación gravitatoria, de forma que los nodos más accesibles son los más próximos a los centroides de las provincias más pobladas. Enfatiza los

grandes contrastes entre las principales aglomeraciones y los espacios periféricos de carácter rural más marcado. Tiene por tanto un enfoque económico.

-Indicador de eficiencia:

Compara los tiempos a través de la red y en línea recta a través de una infraestructura de alta velocidad (cuanto más se aproximen ambos, mejor es la conexión) y los resume en una media ponderada gravitatoria. Destaca los contrastes entre los grandes corredores de transporte y los espacios intersticiales. Tiene un enfoque infraestructural.

La elección del objetivos (u objetivos) y del indicador es por tanto determinante para la evaluación de los niveles de accesibilidad. En esta metodología se proponen los siguientes indicadores:

•Accesibilidad territorial a nudos.

Se utiliza en esta modelización la accesibilidad territorial en términos de tiempo en alcanzar el nudo más cercano de una vía de gran capacidad. Se estima que en ese momento nos encontramos “conectados” a la red.

•Accesibilidad territorial a núcleos.

La accesibilidad a entornos urbanos ya consolidados expresa la mayor aptitud de las zonas contiguas o cercanas a ámbitos ya urbanizados que aquellas que se encuentran desprovistas de infraestructuras de abastecimiento, saneamiento, energía eléctrica...

Se modeliza de igual forma sobre la superficie de fricción pero en este caso tomando como objetivos los centroides de los núcleos urbanos ya existentes.

3.3.4.2.4. Los Gradientes de accesibilidad

La variación de la accesibilidad inducida que se obtiene mediante sustracción (álgebra de mapas) es denominada “gradiente de accesibilidad territorial” (a nudos y a núcleos).

Reflejan el beneficio, la variación o ganancia en términos de tiempo (minutos) que propician las nuevas infraestructuras.

Experiencias similares pueden consultarse en Marr et al. 2007 para la región de Michoacán, México o en Gutiérrez et al. 1999 en Madrid.

3.4. El impacto territorial de las nuevas infraestructuras viarias. Aplicaciones prácticas sobre accesibilidad.

Se aplica ahora esta metodología a diversos ámbitos supramunicipales, comarcales y regionales. El resultado gráfico es sumamente explicativo.

La segunda circunvalación de Granada:

Se simula en el siguiente ejemplo los efectos de la puesta en servicio de una nueva vía de alta capacidad como será la segunda circunvalación de la ciudad de Granada materializado en el “Proyecto de Variante Exterior de Granada y Acceso a su Aeropuerto” de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (Junio de 2001)

La metodología específica seguida en esta aplicación se puede resumir en los siguientes pasos:

- Generación del mdt mediante interpolación a partir de curvas de nivel.
- Generación de pendientes mediante técnicas de análisis de vecindad y reclasificación en intervalos adecuados.
- Confección de una capa de viario (actual y futuro) y asignación de velocidades a cada uno de los tipos de vía. Conversión a formato raster. (Figuras 3.77 y 3.78)
- Superposición de las capas de viario y pendientes y generación de las superficies de fricción actual y futura (Figura 3.79)
- Identificación y digitalización de objetivos, en este caso los nudos de la autovía existente (A-44) y los del nuevo trazado.
- Aplicación del algoritmo Costo-Distancia implementado bajo el entorno de ArcGis.
- Obtención de las superficies de accesibilidad en términos de tiempo de viaje y clasificación en intervalos o isócronas. (Figuras 3.81 y 3.82)

Se calculan además las áreas tributarias pertenecientes a cada nodo y se hace una superposición de las superficies de accesibilidad generadas (actual y futura) me-

dante el operador diferencia. El resultado es un mapa de variación o gradiente de accesibilidad (Figuras 3.83 y 3.84)

Otras experiencias con esta misma metodología se aplican a la Cuenca del Guadalfeo, el puerto de Motril, la A-92, la Granada-Badajoz y en las diversas actuaciones del proyecto Activa-Jaen.

Los nudos son lugar de intercambio, atracción, y generación de flujos, innovaciones, centralidades y crecimiento urbano. Por ello, valorar la distancia/tiempo al nudo más cercano nos da un gradiente de lugares, hipotéticamente más frecuentados, detectándose áreas de mayor centralidad para la localización urbana, al mismo tiempo que islas de menor presión sobre las infraestructuras viarias. A partir del límite de los 10-15 minutos cabría identificar áreas de reequilibrio y distensión urbana para no sobrecargar más los nudos y esponjar el conjunto metropolitano.

Así, pensando en escenarios futuros de la accesibilidad, se valora la afección de la puesta en servicio de la 2ª circunvalación, que viene a reforzar las relaciones nortesur (más o menos tangenciales a Granada y la 1ª corona), no siendo excesivamente difusora de la accesibilidad en las relaciones este-oeste, lo que hace reflexionar sobre la necesidad de explorar medidas complementarias sobre la movilidad privada (nudos, accesos y capilares) y la movilidad pública (ubicación de líneas, intercambiadores, y paradas metropolitanas).

De la vinculación entre accesibilidad y urbanización, se compara de nuevo la situación actual con la que se prevee tras la puesta en funcionamiento de la 2ª circunvalación, si bien en este caso, para identificar que nudos (a priori, sin entrar de momento en la valoración de flujos) se encuentran o encontrarían más cargados por la demanda física de suelo urbano.

En este sentido, la 2ª circunvalación ayuda a repartir la carga de algunos nudos, generando más alternativas donde enganchar a los usuarios metropolitanos, aunque al igual que se apreciaba anteriormente no tiene gran capacidad de alteración global en el conjunto de cuencas seleccionadas. En cualquier caso, esta situación ilustra la oportunidad de implementar de forma vinculada políticas de densidad, centralidad, espacios libres y transporte público en torno a los nudos.

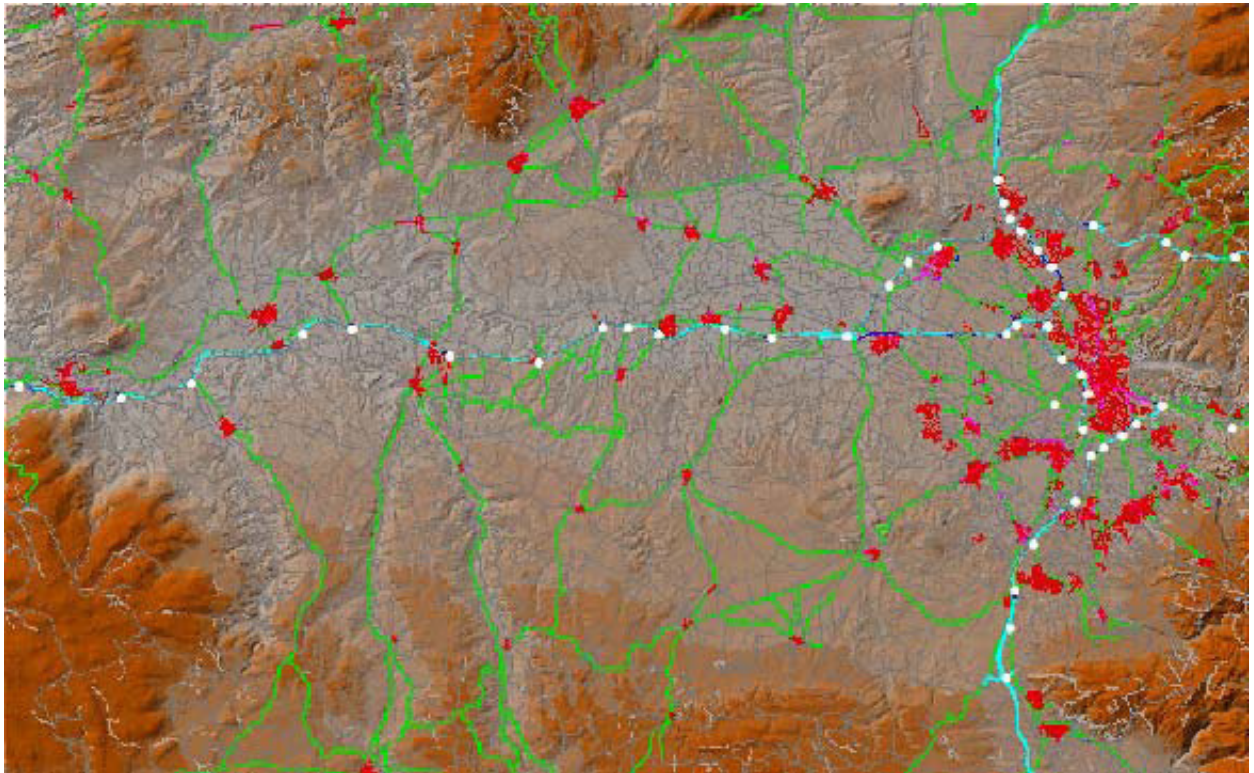
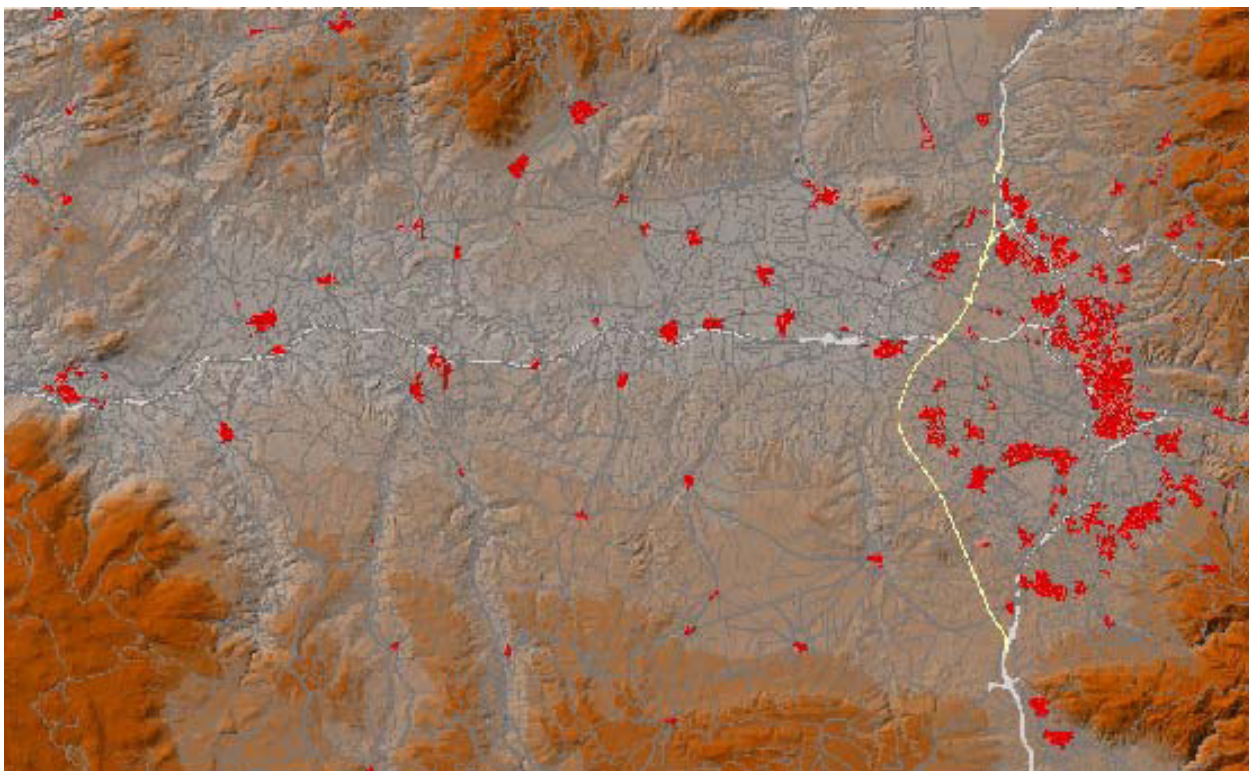


FIGURA 3.77. Red viaria Actual en el área metropolitana granadina. Elaboración propia.
FIGURA 3.78. Red viaria con la propuesta de segunda circunvalación. Elaboración propia.



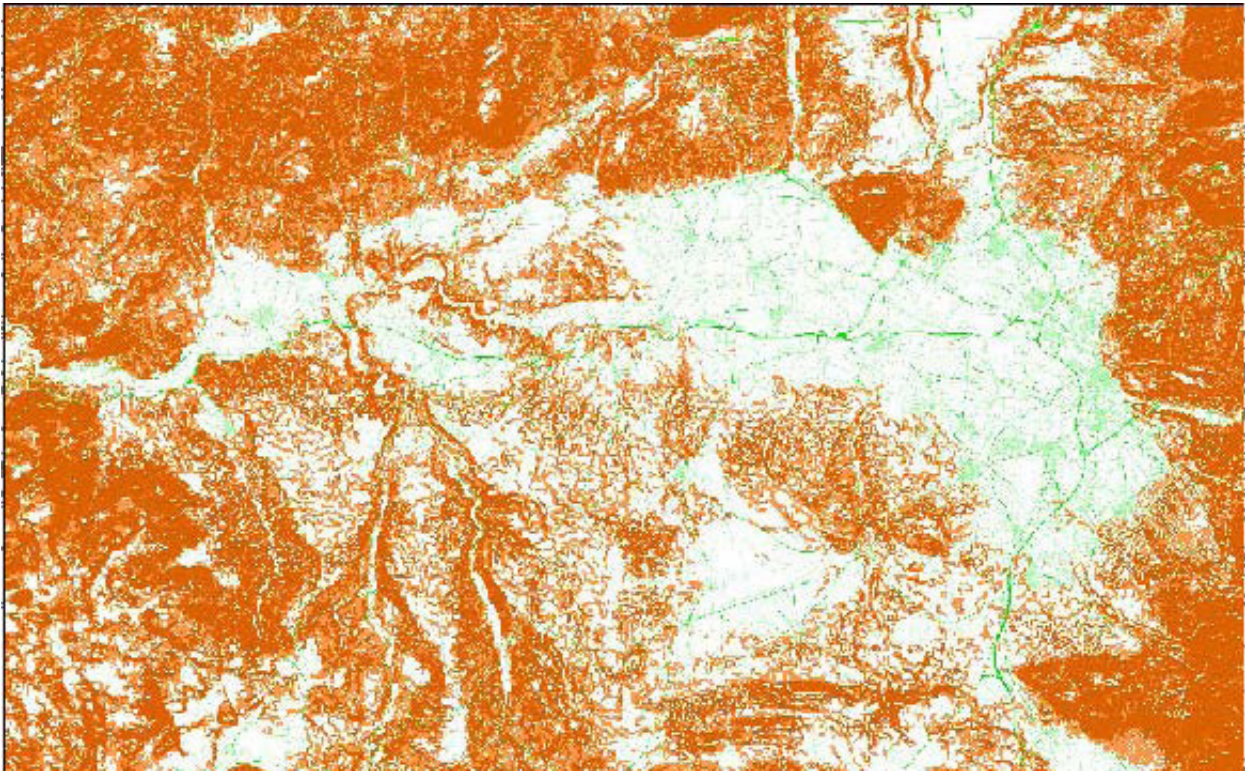
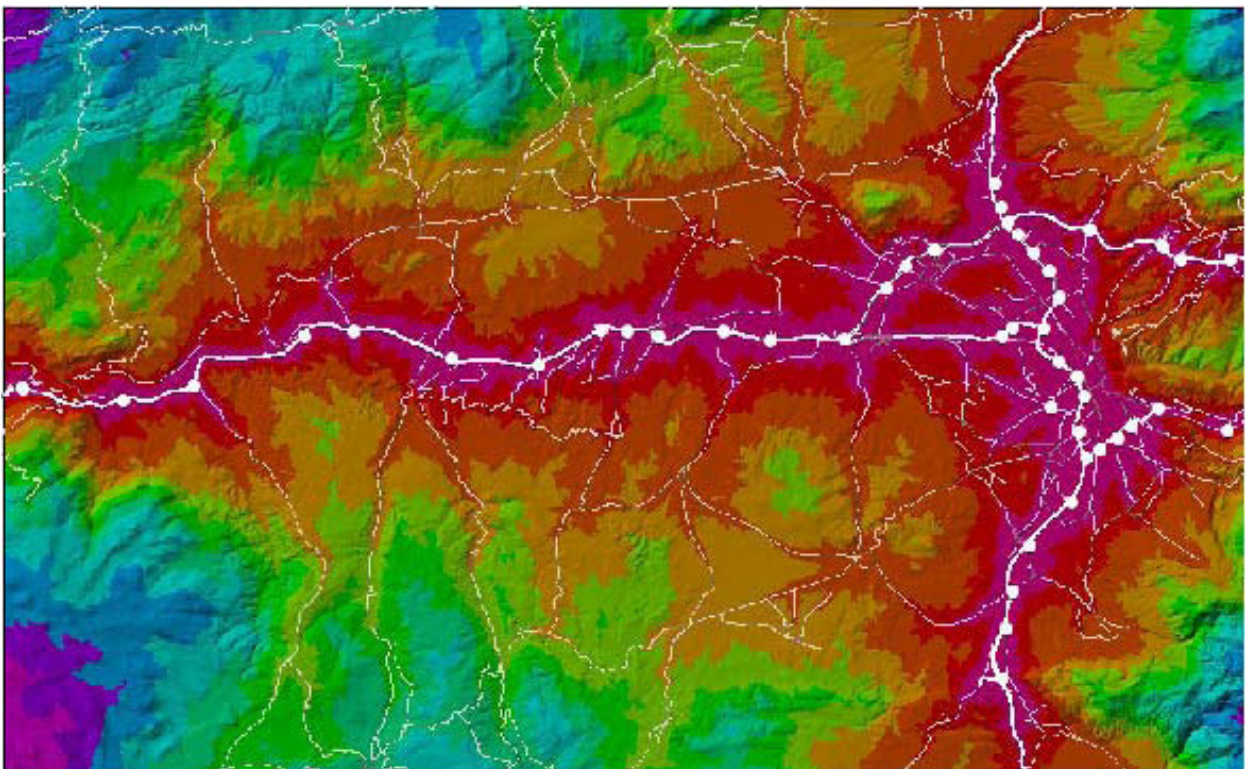


FIGURA 3.79. Superficie de fricción. Elaboración propia.
FIGURA 3.80. Accesibilidad a los nudos de Autovía.



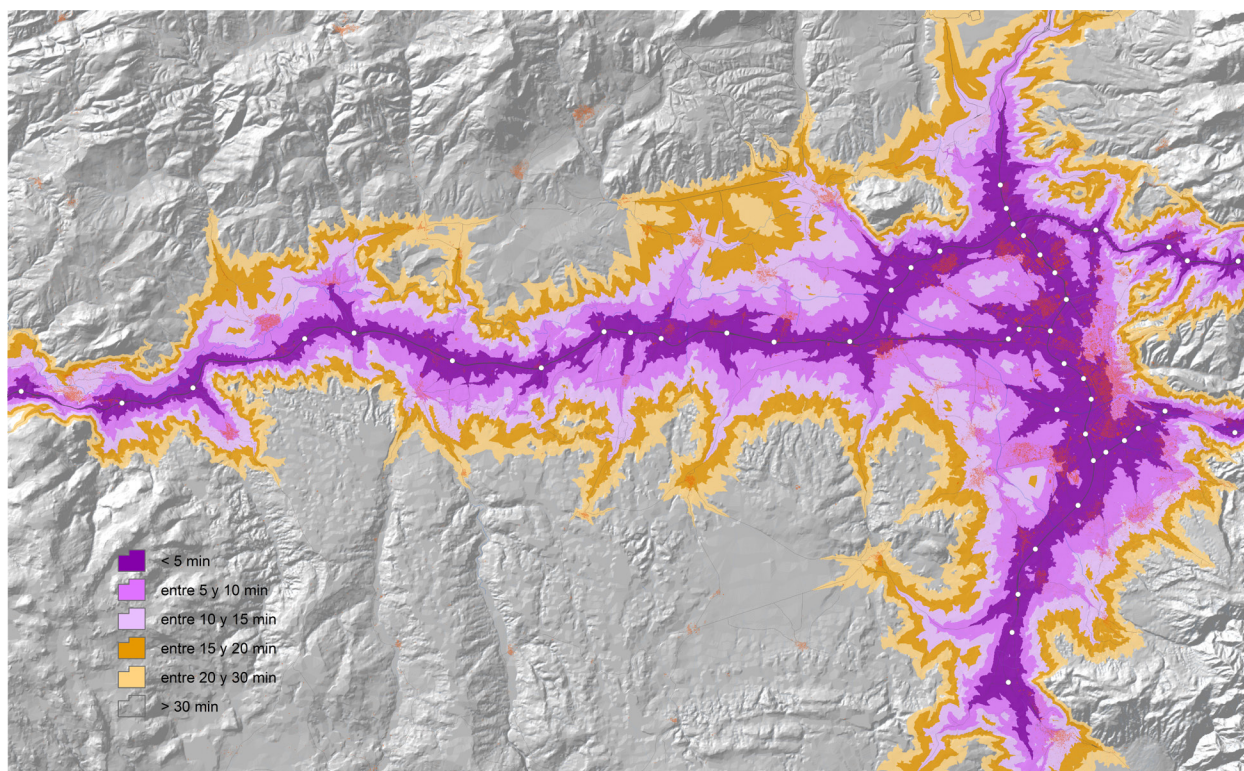
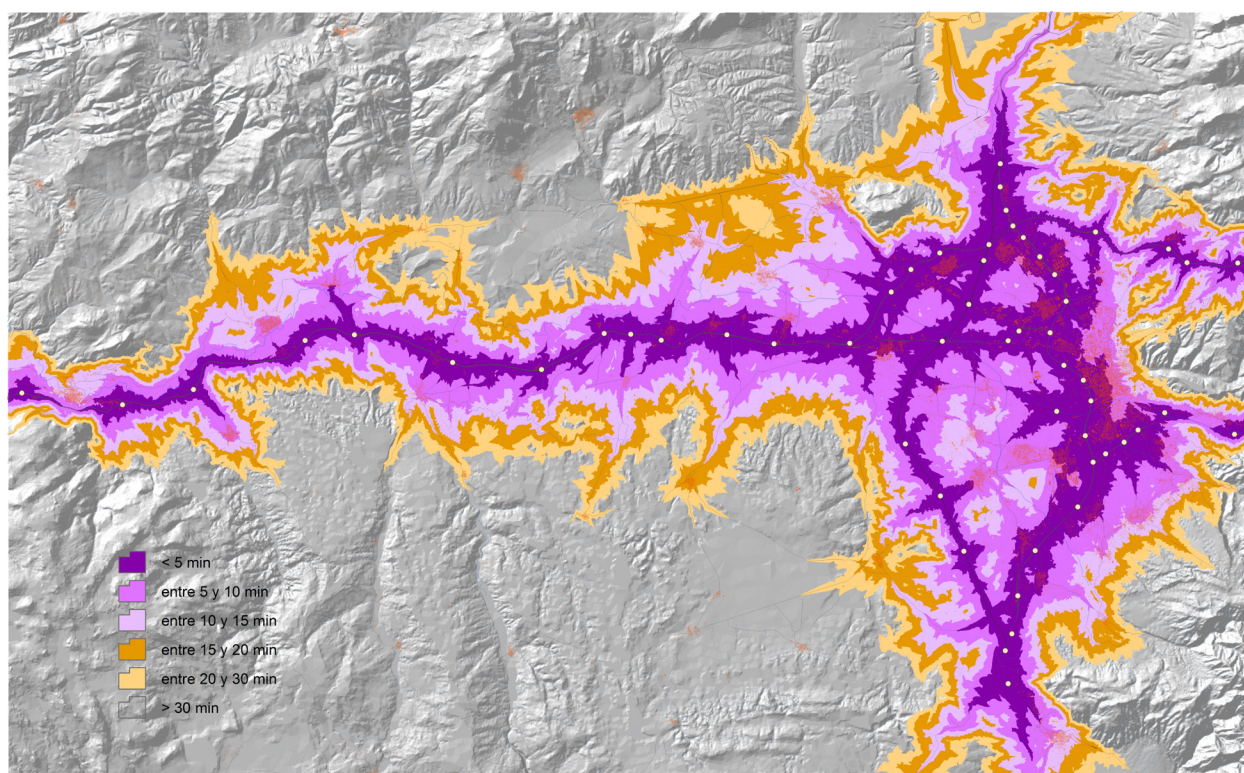


FIGURA 3.81. Isocronas de Accesibilidad Actual. Elaboración propia.

FIGURA 3.82. Isocronas de Accesibilidad con la Segunda Circunvalación. Elaboración propia.



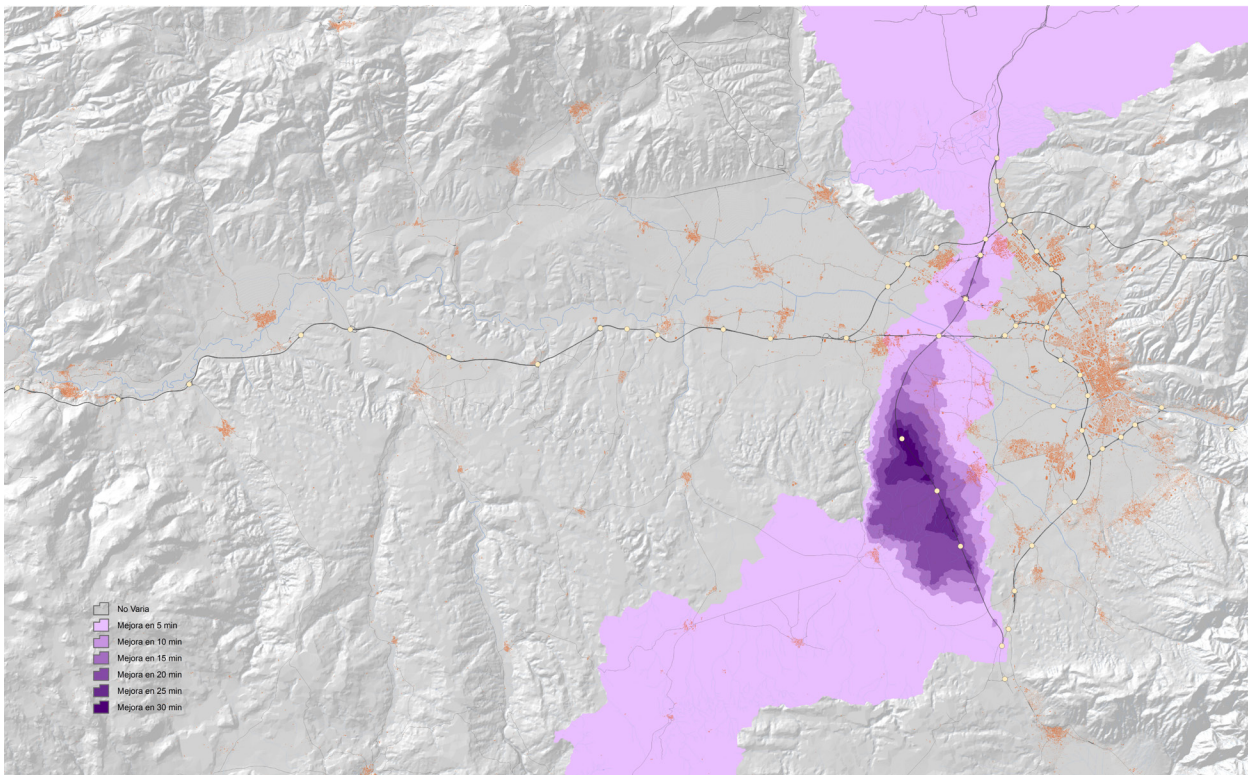
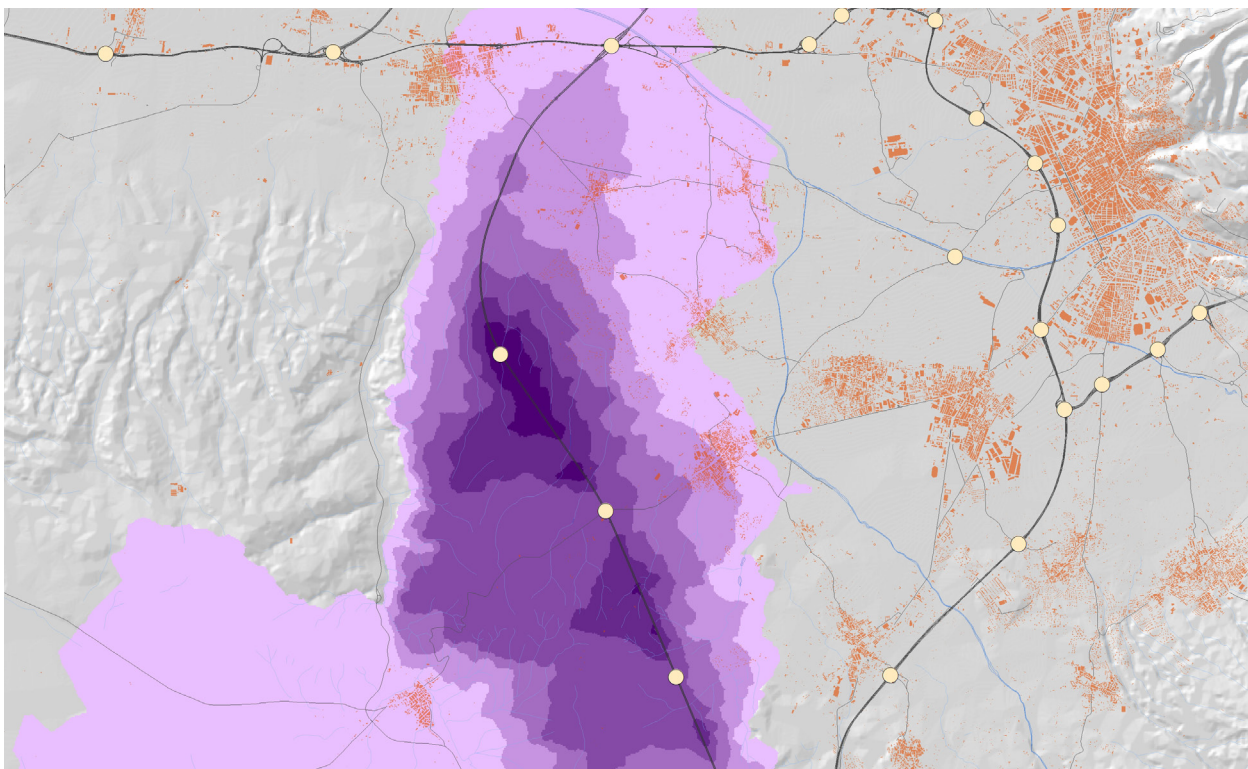


FIGURA 3.83. Gradiente de Accesibilidad. Superficies de oportunidad en los accesos al nuevo viario. Elaboración propia.

FIGURA 3.84. Detalle del gradiente de accesibilidad para la segunda circunvalación de Granada



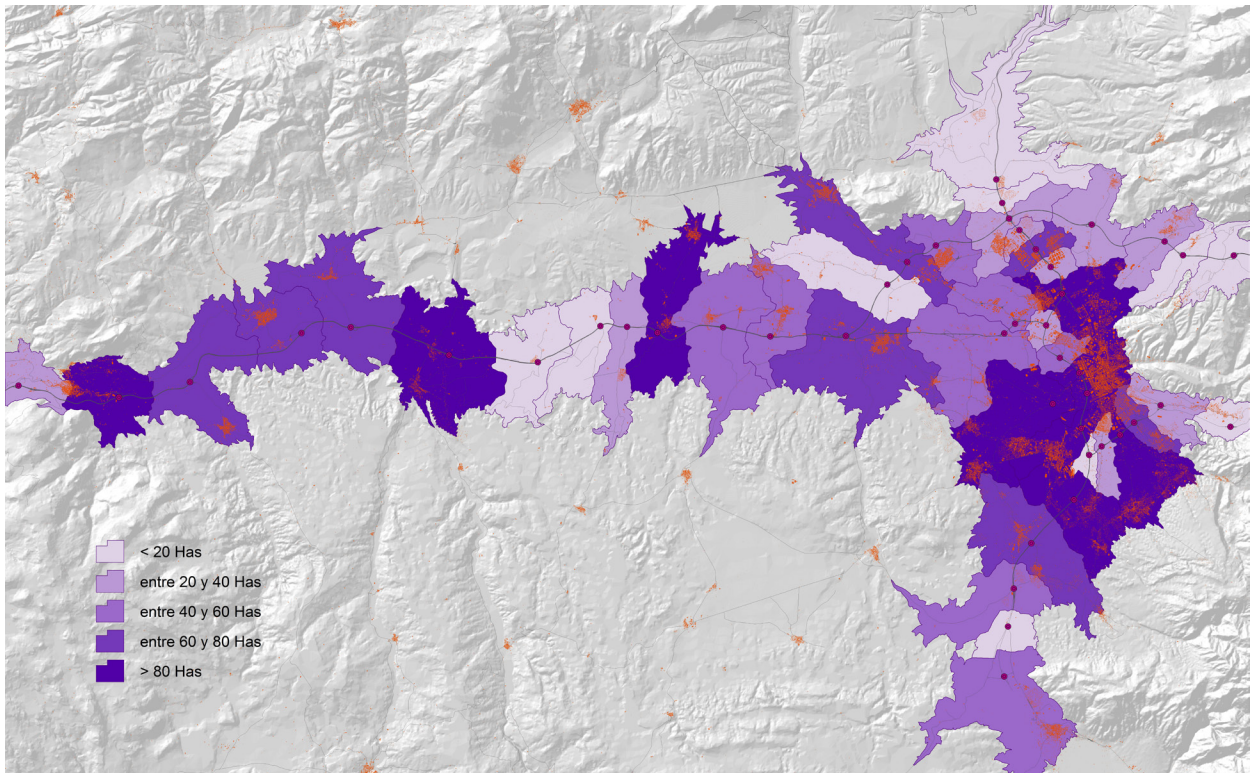
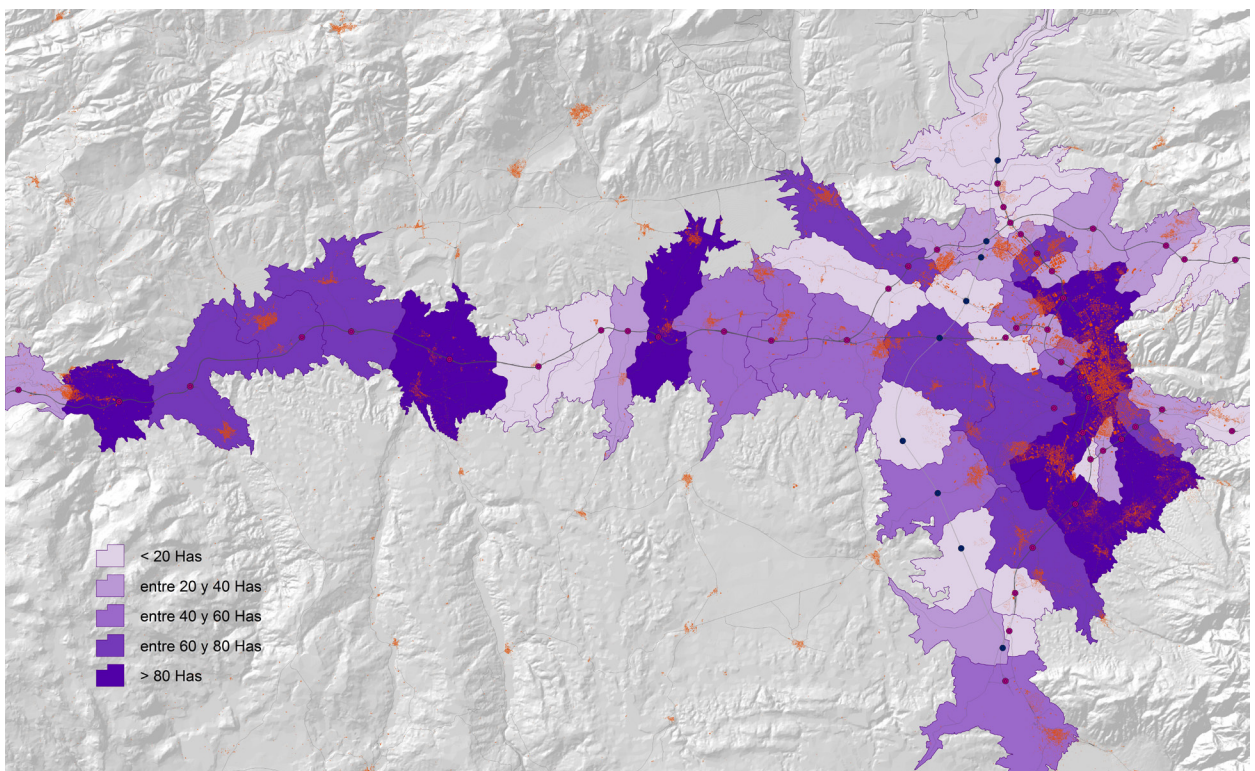


FIGURA 3.85. Áreas de Influencia de los nudos de autovía considerados para el estado inicial.

FIGURA 3.86. Áreas de Influencia con la segunda circunvalación.



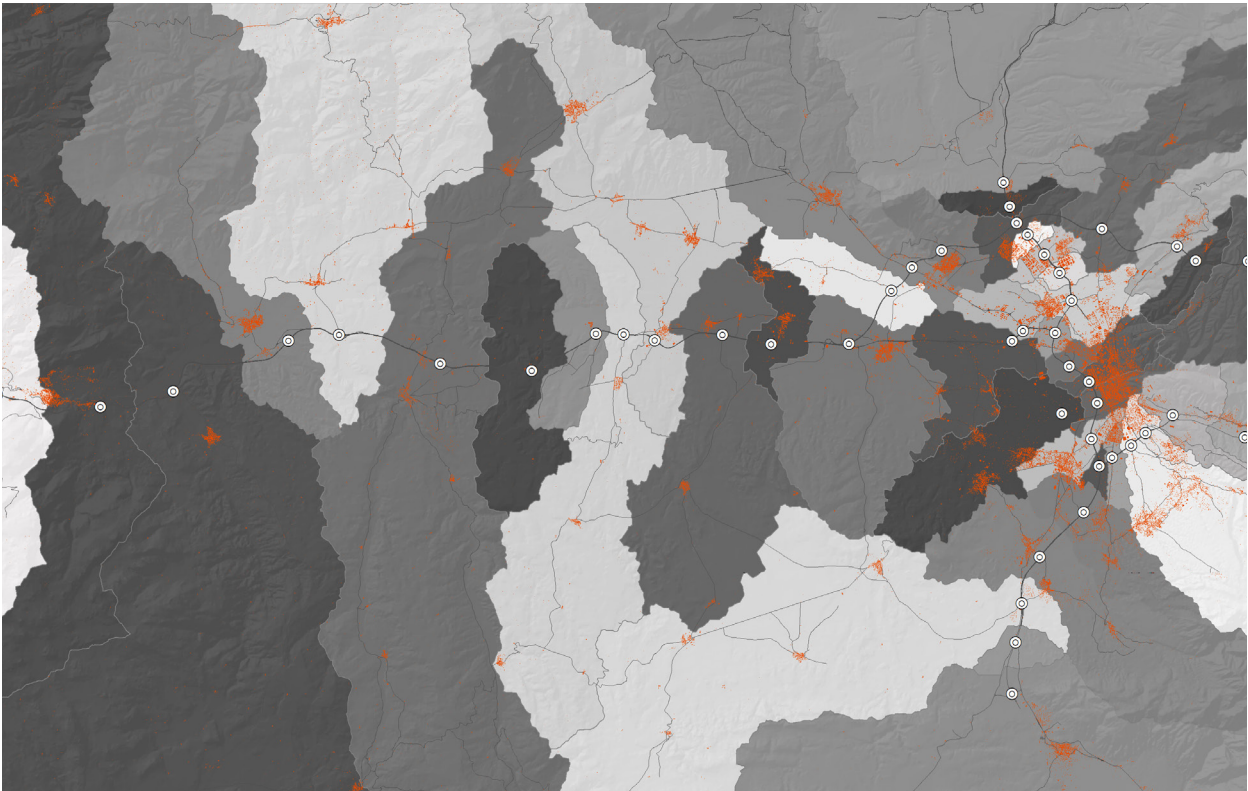
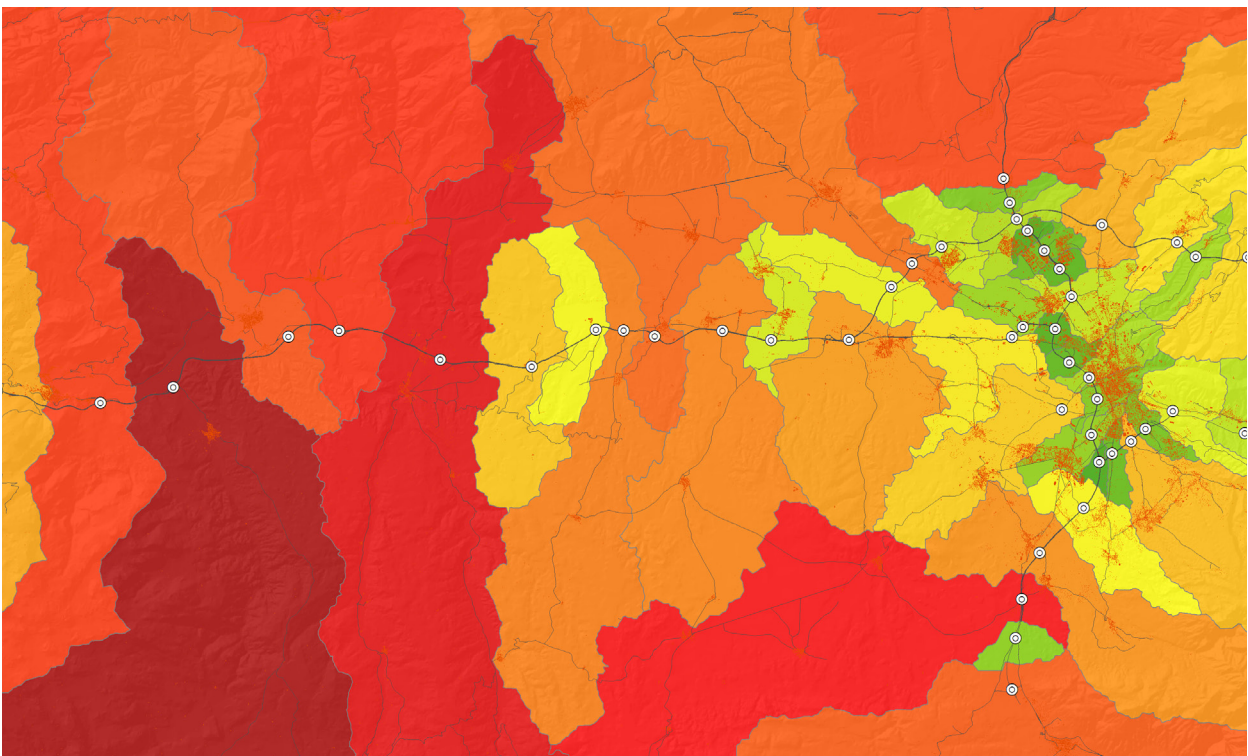


FIGURA 3.87. Caracterización de las áreas de influencia en función del área servida. Elaboración propia.

FIGURA 3.88. Caracterización de las áreas de influencia en función de la superficie edificada que contiene. Elaboración propia.



La Autovía GR-43 Badajoz - Córdoba - Granada.

El origen de esta aplicación se encuentra en la reestructuración de la red viaria andaluza que, buscando la mejora de las comunicaciones dentro del territorio, así como de variantes de comunicación con otras comunidades autónomas, alternativas a las actuales, que procuren el desarrollo de zonas tradicionalmente desatendidas en función de intereses de vertebración territorial nacional.

Dentro del nuevo modelo de distribución de los flujos de comunicación andaluces, se centra la atención en una infraestructura que afecta de manera especial a las provincias de Jaén, Granada, Córdoba y Badajoz.

El proyecto de construcción de la autovía GR-43, para el acceso a Granada por la N-432, Badajoz-Granada por Pinos Puente- Atarfe (Enlace con la A-44), en la provincia de Granada, trazando la diagonal que resulta determinante en las comunicaciones de Granada con Córdoba, así como de Andalucía Oriental con Extremadura y Portugal cruzando la A-316 (Úbeda-Jaén-Cabra) a la altura de Cabra.

En este sentido, dado que a priori, las infraestructuras viarias tienen, un efecto positivo sobre el crecimiento económico de un territorio, se propone estimar la evaluación del impacto de las mismas sobre el tejido económico y social de los territorios a los que afectan desde la óptica de la accesibilidad.

Para determinar el Impacto de las infraestructuras viarias en los sistemas urbanos se analizarán los posibles cambios jerárquicos en dicho sistema, inducidos por las centralidades generadas por las nuevas condiciones de accesibilidad establecidas por las nuevas autovías.

El presente estudio se ha realizado bajo el entorno de trabajo de ArcGis 9.3 y del módulo Spatial Analyst, empleando un modelo digital de elevaciones de 50 m de resolución y cartografía vectorial de la red viaria en su estado actual, así como la futura Autovía Badajoz-Córdoba- Granada digitalizada según su futuro trazado que consta en los Estudios Informativos existentes (tramo Badajoz-Espiel TYPESA, 2007, y tramo Espiel - Granada APIAXXI, 2007)

Existe una importante relación entre los niveles de accesibilidad del territorio, entendida en términos de calidad y diversidad de las comunicaciones de que dispone (Galán,1999), y la distribución de los usos en el mismo.

Esta relación tiene que ver con unas necesidades de movilidad, tanto de la población como de las empresas, de forma que en función también de las posibilidades de movilidad, y de esas necesidades de alcanzar unos servicios, determinados espacios donde realizar actividades o, en el caso de algunas empresas, de ser alcanzadas, la accesibilidad se convierte en un elemento a considerar en las pautas de localización.

De esta forma, cambios en la accesibilidad podrían suponer cambios en la distribución y en la intensidad de los usos del suelo y, por tanto, cambios también en el propio precio del mismo. Pero además, se pueden relacionar accesibilidad con factores como la densidad residencial, con la localización de suelo industrial o de lugares de ocio, o con variables de tipo social como la renta, el nivel de estudios, etc.

- Accesibilidad interna.

Se adopta como definición de accesibilidad interna la capacidad de acceso de cada una de las poblaciones cabecera de municipio, al núcleo principal más cercano, como indicador de cohesión interna de la provincia.

Los resultados obtenidos permiten agrupar los núcleos de forma análoga al modelo de sistemas de ciudades recogido en el Plan de Ordenación del Territorio Andaluz.

Las métricas de accesibilidad interna son entendidas, como se refleja en la metodología ya adjunta, como el tiempo en recorrer la distancia más corta entre cada punto del territorio y el más cercano de los 32 núcleos de población de más de 15.000 habitantes de las provincias de Granada, Jaén, Córdoba y Badajoz.

La comparativa de tiempos entre el estado actual y la futura situación con la puesta en servicio de las nuevas actuaciones, pone de manifiesto cuáles son, tanto la magnitud de los cambios producidos, según gradiente, como la distribución espacial de los mismos.

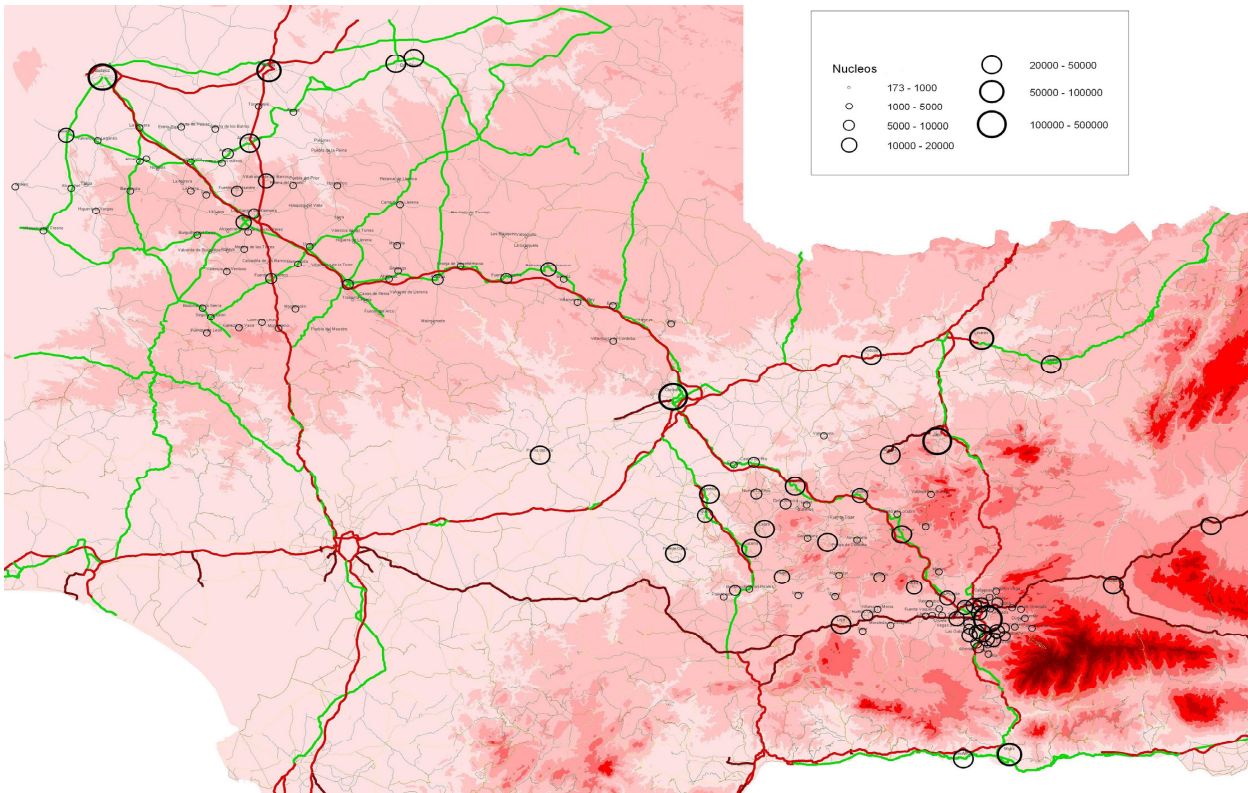
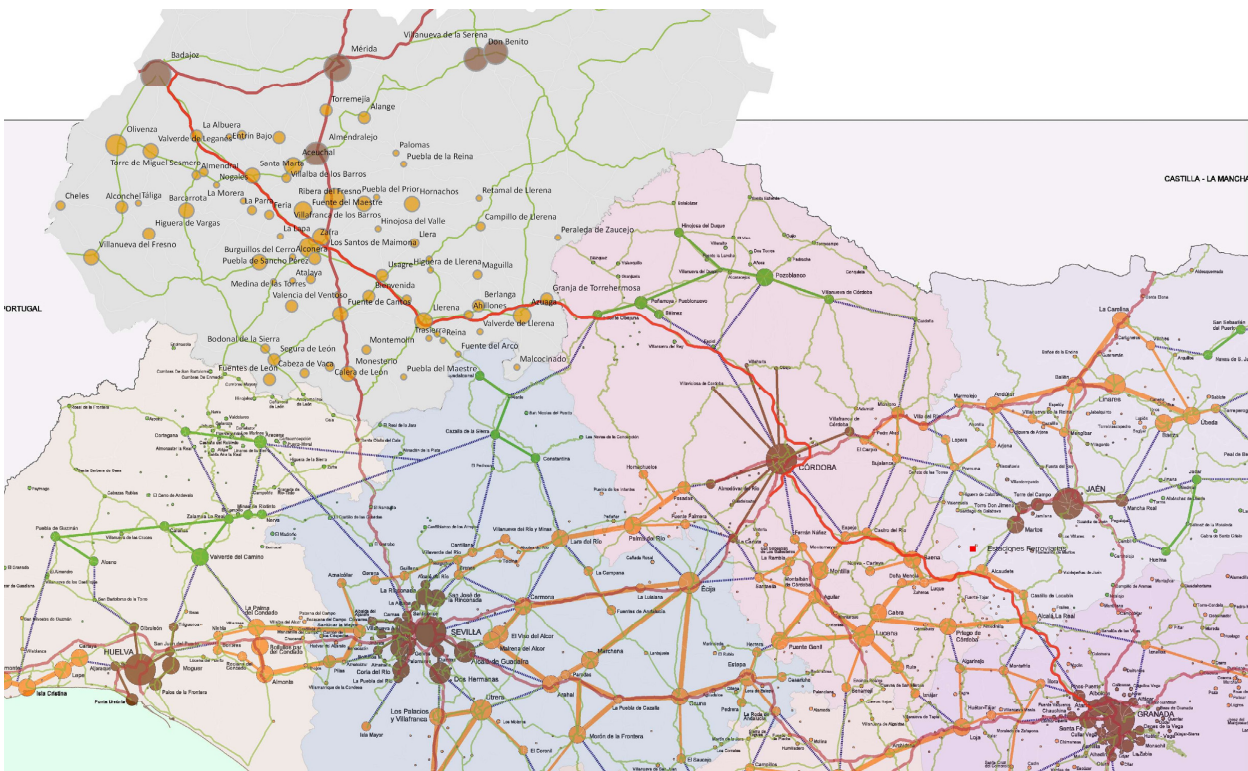
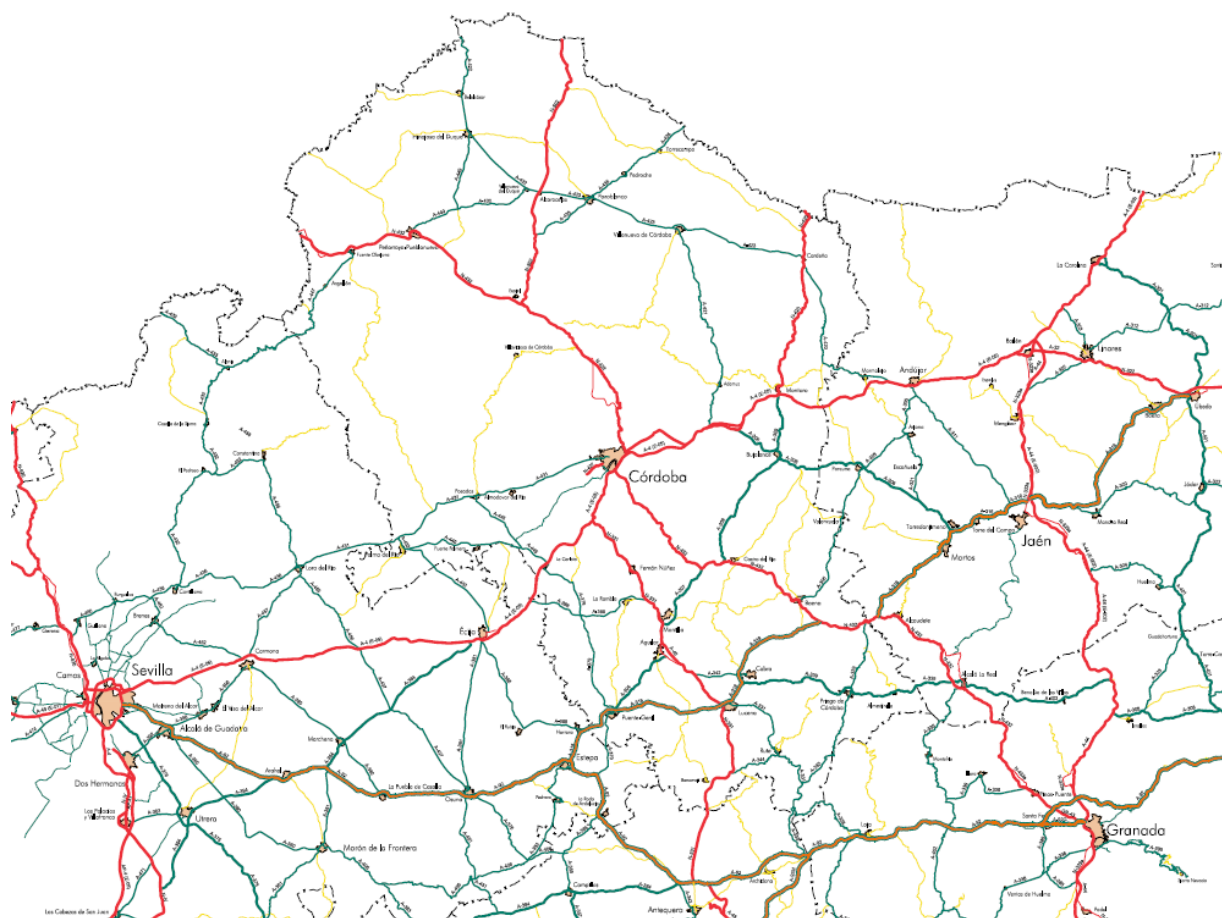


FIGURA 3.89. Red viaria futura y núcleos considerados según su población. Elaboración propia.

FIGURA 3.90. Sistema de ciudades del ámbito de estudio según el modelo territorial del Plan de Ordenación del Territorio de Andalucía y actuaciones previstas. Fuente: POT (COPT, 2006) y elaboración propia





MAPA DE CARRETERAS DE ANDALUCÍA
RED AUTONÓMICA Y RED DEL ESTADO

FIGURA 3.91. Red viaria estatal y autonómica de Andalucía del ámbito de estudio

- Red de Carreteras del Estado —
- Red Autonómica
 - Red Básica
 - Estructurante —
 - De Articulación —
 - Red Intercamarcial —
 - Red Complementaria Metropolitana —
 - Red Complementaria —

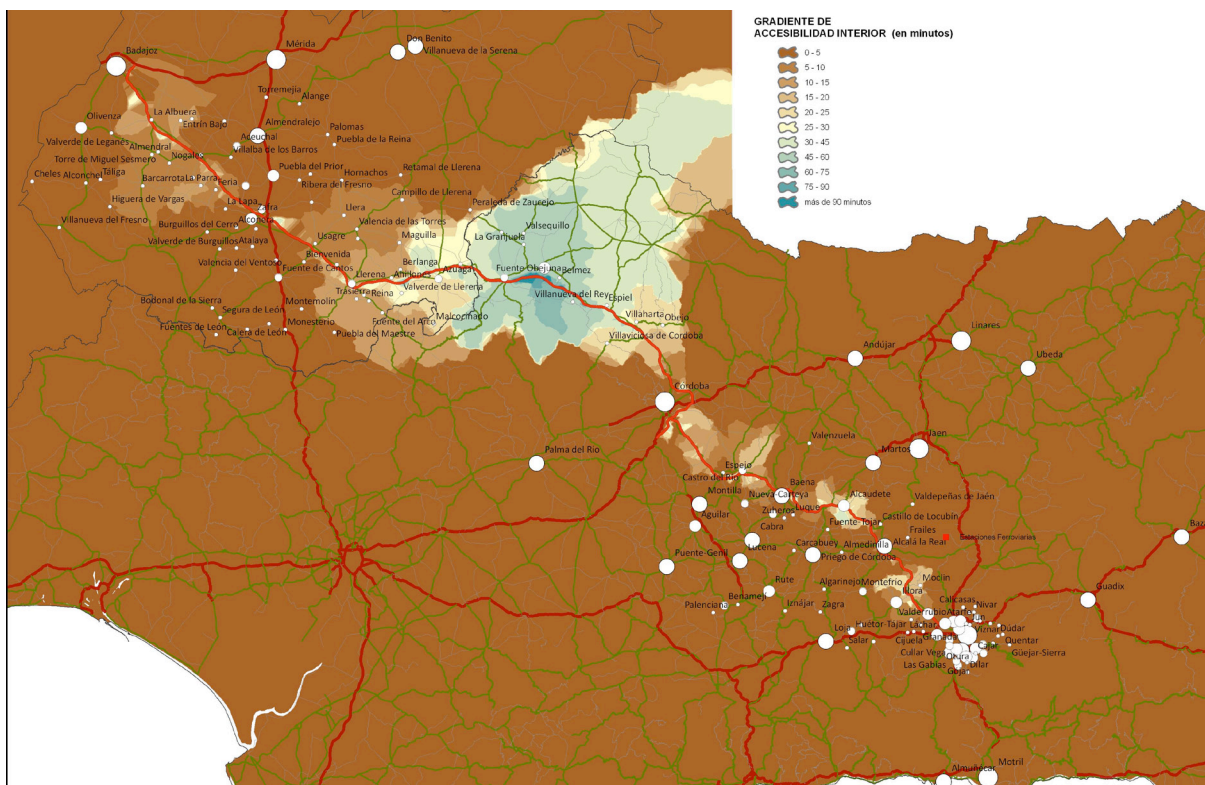
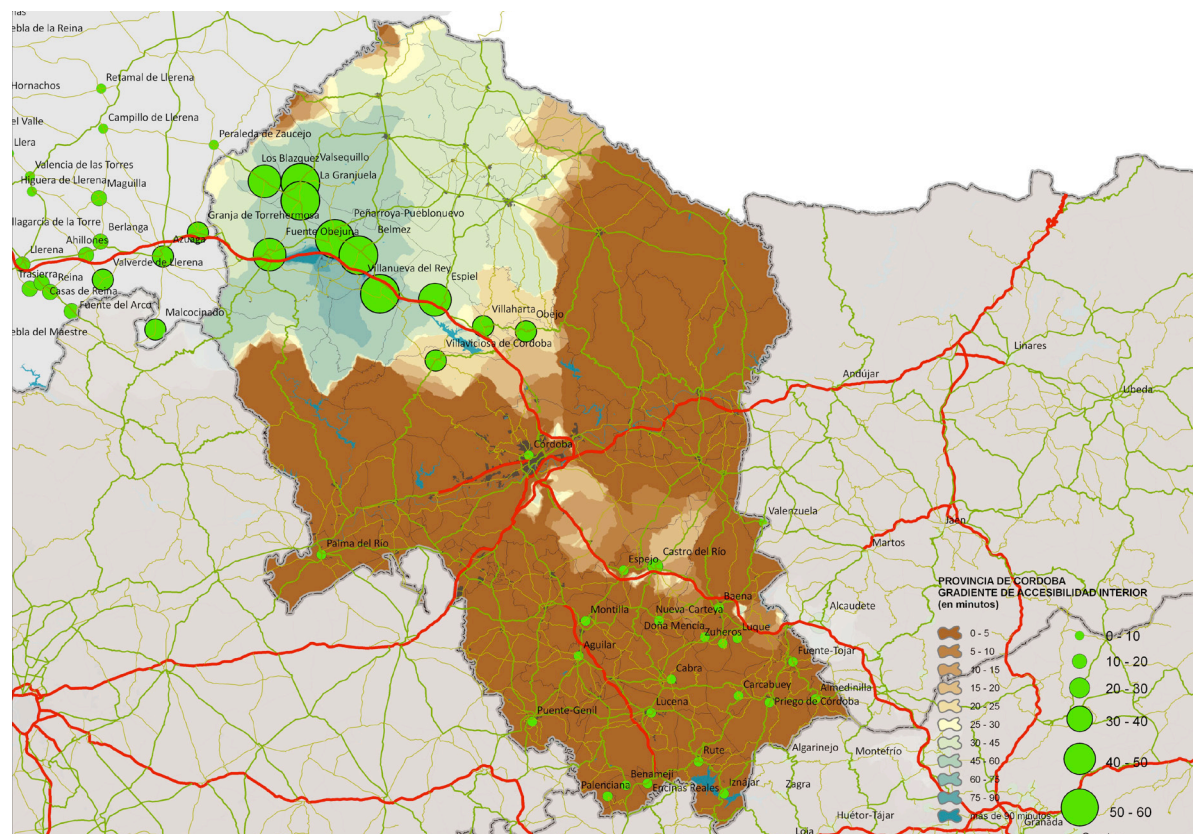


FIGURA 3.89. Gradiente de accesibilidad interna para los núcleos considerados a través de la red viaria actual y futura
 FIGURA 3.90. Gradiente de accesibilidad interna y valores en las cabeceras municipales en la provincia de Córdoba



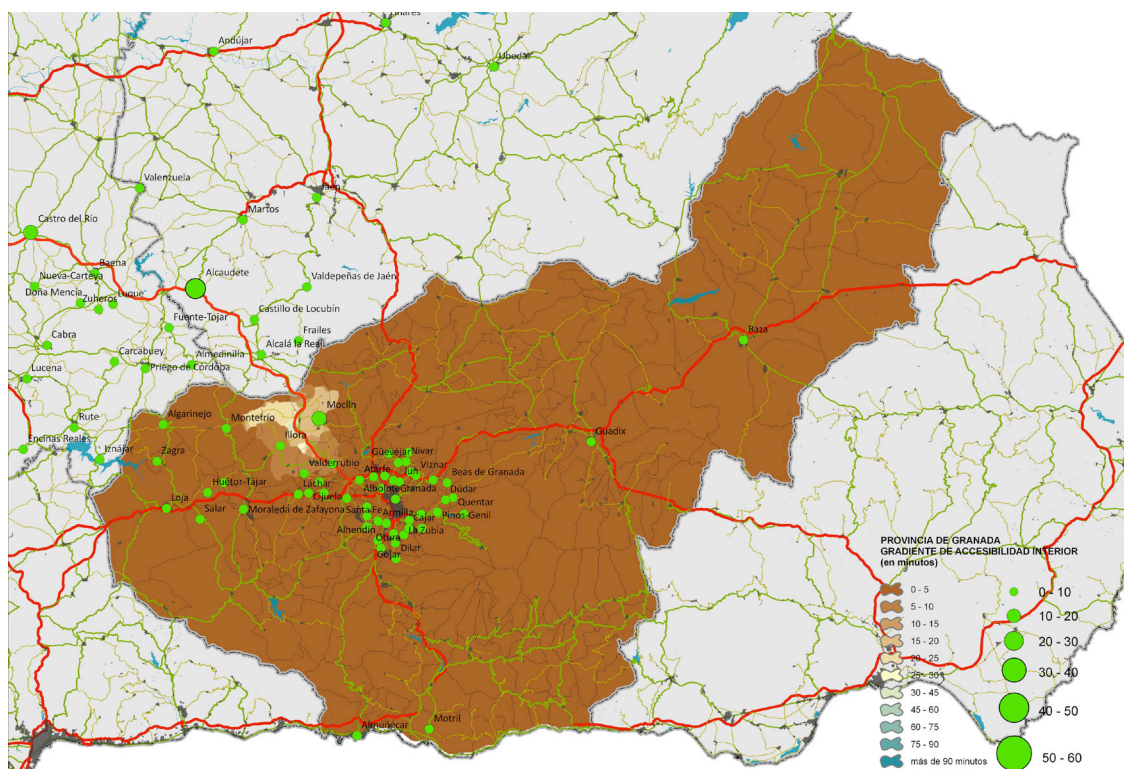
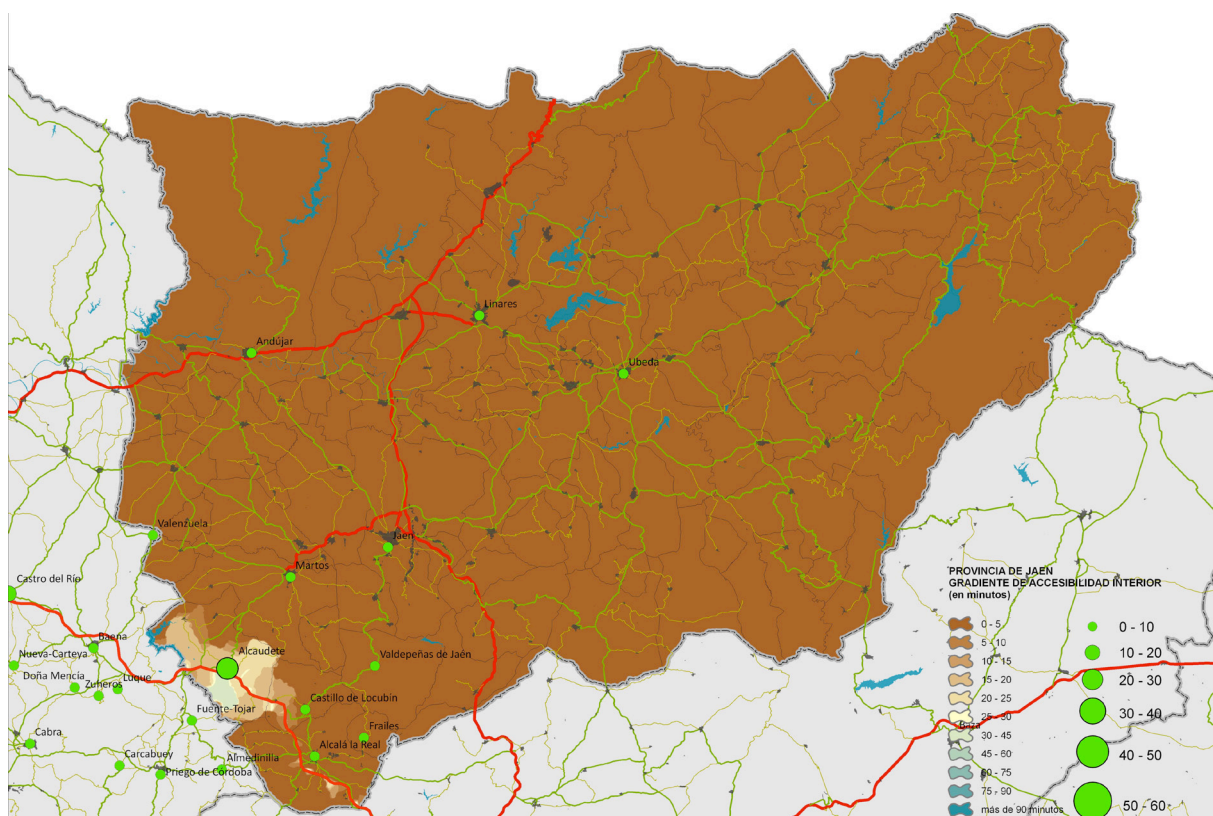


FIGURA 3.89. Gradiente de accesibilidad interna y valores en las cabeceras municipales en la provincia de Granada

FIGURA 3.90. Gradiente de accesibilidad interna y valores en las cabeceras municipales en la provincia de Jaén



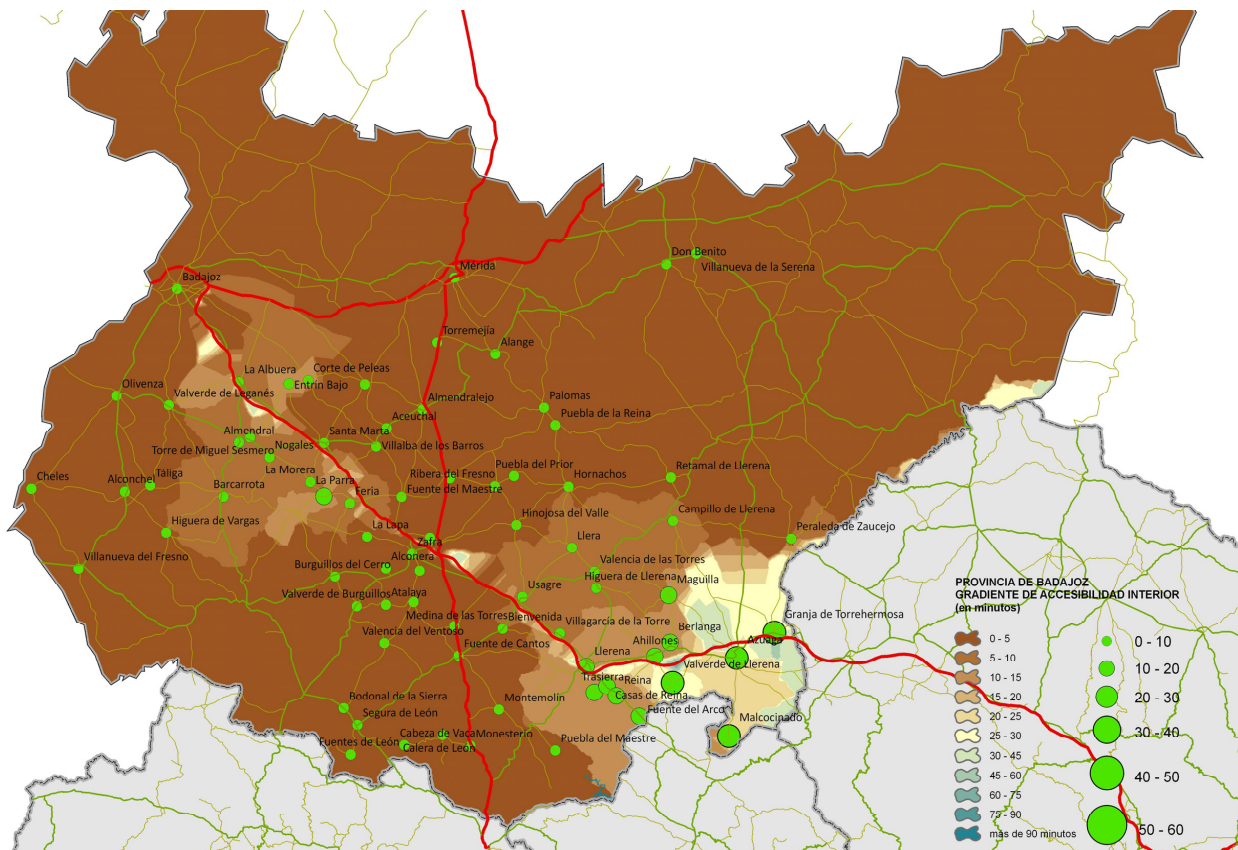


FIGURA 3.92. Gradiente de accesibilidad interna y valores en las cabeceras municipales en la provincia de Badajoz

Se obtienen mediante sustracción (álgebra de mapas) los gradientes de accesibilidad interna o ganancias en términos de tiempo (minutos) que propician las nuevas infraestructuras.

Este indicador descubre como los núcleos de norte de la provincia de Córdoba y del sur de la de Badajoz son los notablemente más beneficiados en su accesos al resto de núcleos principales del área, con mejoras próximas a la hora, gracias al desdoblamiento de la actual carretera N-432.

Particularmente mejoran con 54 minutos las poblaciones cordobesas de Peñarroya-Pueblonuevo y Bélmez, con 52 minutos las de Villanueva del Rey, La Granjuela y Valsequillo, y las poblaciones de Badajoz en menor medida, como Valverde de Llerena con 27 minutos y Azuaga con 23. (Figura x).

Se adjuntan, para una mayor claridad, cartografías de los gradientes de accesibilidad internas por provincias (Figuras x).

- Accesibilidad externa.

Se adopta como accesibilidad externa la capacidad de acceso de cada una de las poblaciones cabecera de municipio hacia el exterior del ámbito de estudio o sus centros principales, tomando como objetivos los centros regionales del entorno de Sevilla, Málaga, Jaén, Granada, Córdoba y Badajoz, así como las salidas por la ruta de la Plata (A-66) al norte de Mérida, y las salidas hacia Madrid al este de Mérida por la A-5, y por el paso de Despeñaperros (A-4).

De manera individualizada se obtienen los tiempos mínimos de recorrido (en horas) y mediante algebra de mapas se realiza la sumatoria de tiempos hacia los nueve objetivos seleccionados (Gradiente exterior en minutos).

Se adjuntan primeramente cartografías de las isocronas de accesibilidad exterior con los núcleos considerados para las cuatro capitales provinciales del ámbito como objetivo, para las situaciones de la red viaria actual y la

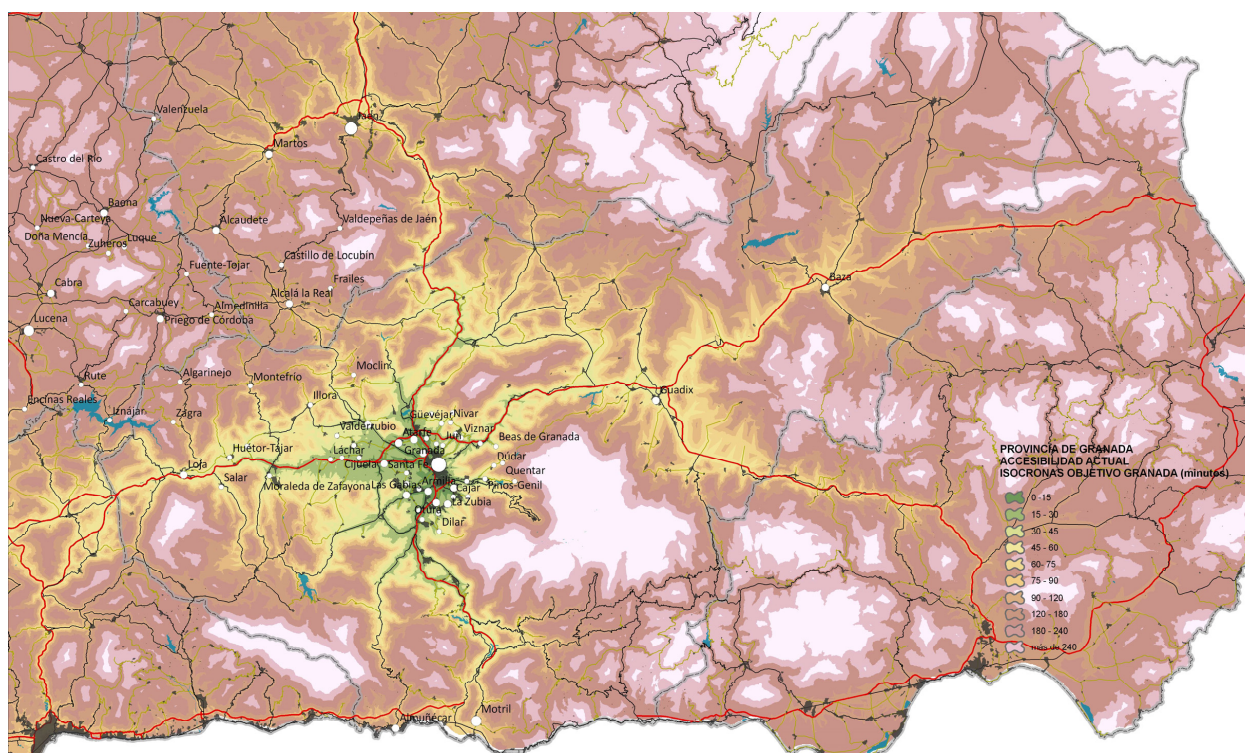
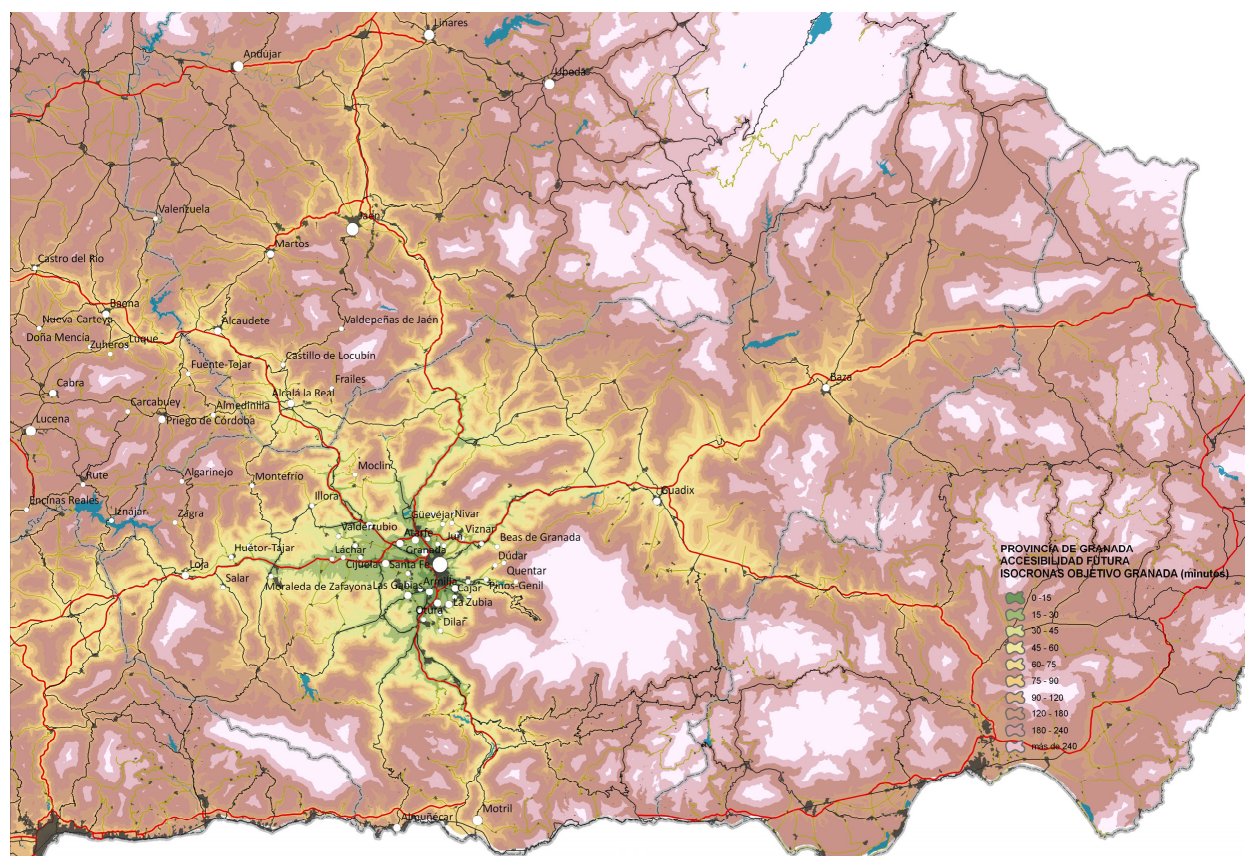


FIGURA 3.93. Red viaria actual, núcleos e isocronas de accesibilidad externa con objetivo Granada

FIGURA 3.94. Actuaciones previstas, objetivos e isocronas de accesibilidad externa futura con objetivo Granada



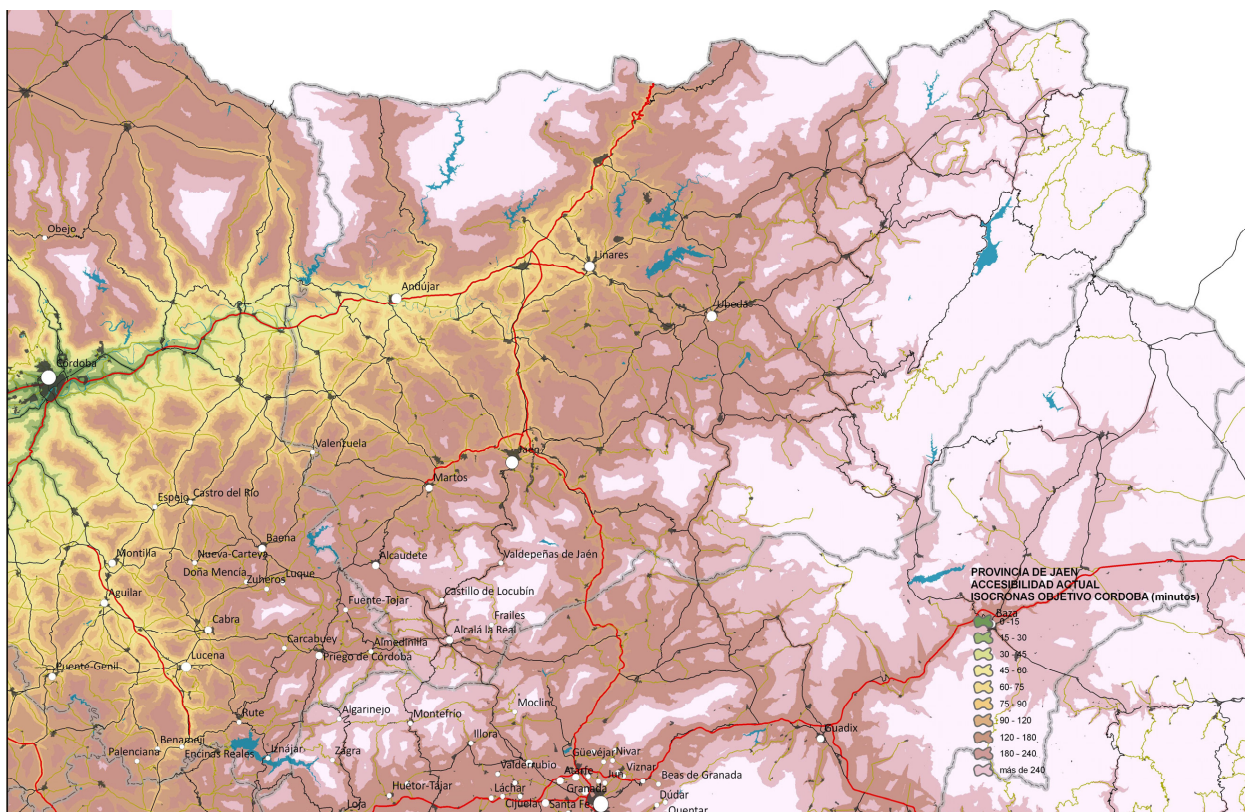
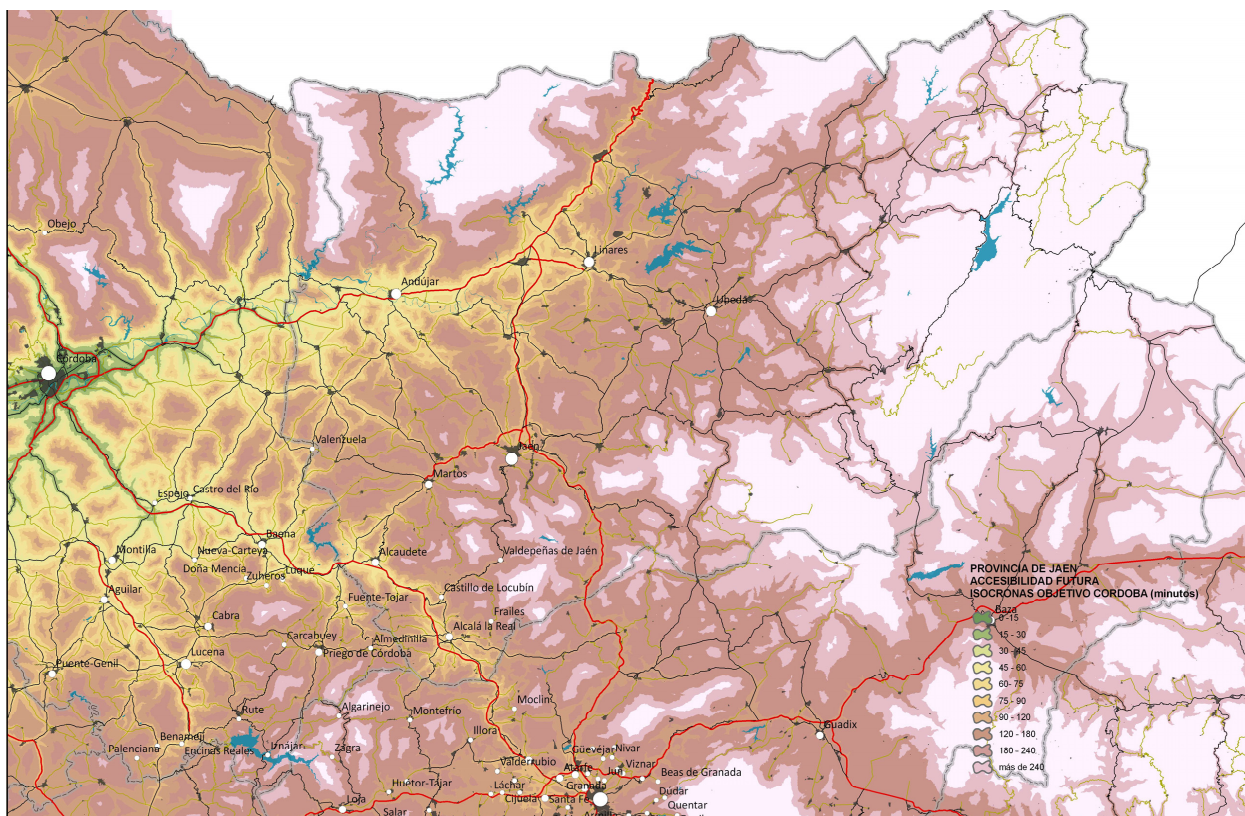


FIGURA 3.95. Red viaria actual, núcleos e isocronas de accesibilidad externa con objetivo Córdoba. Provincia de Jaén

FIGURA 3.96. Actuaciones previstas, objetivos e isocronas de accesibilidad externa futura con objetivo Córdoba.



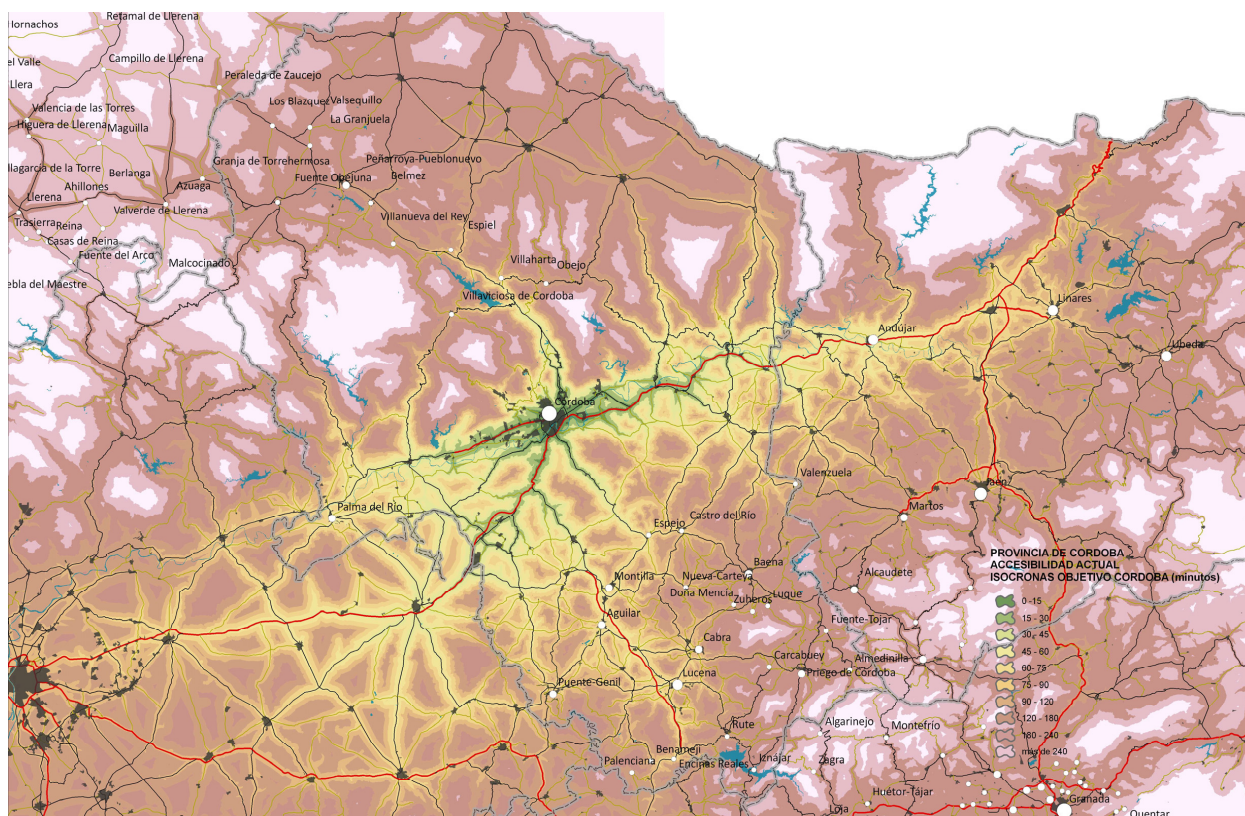
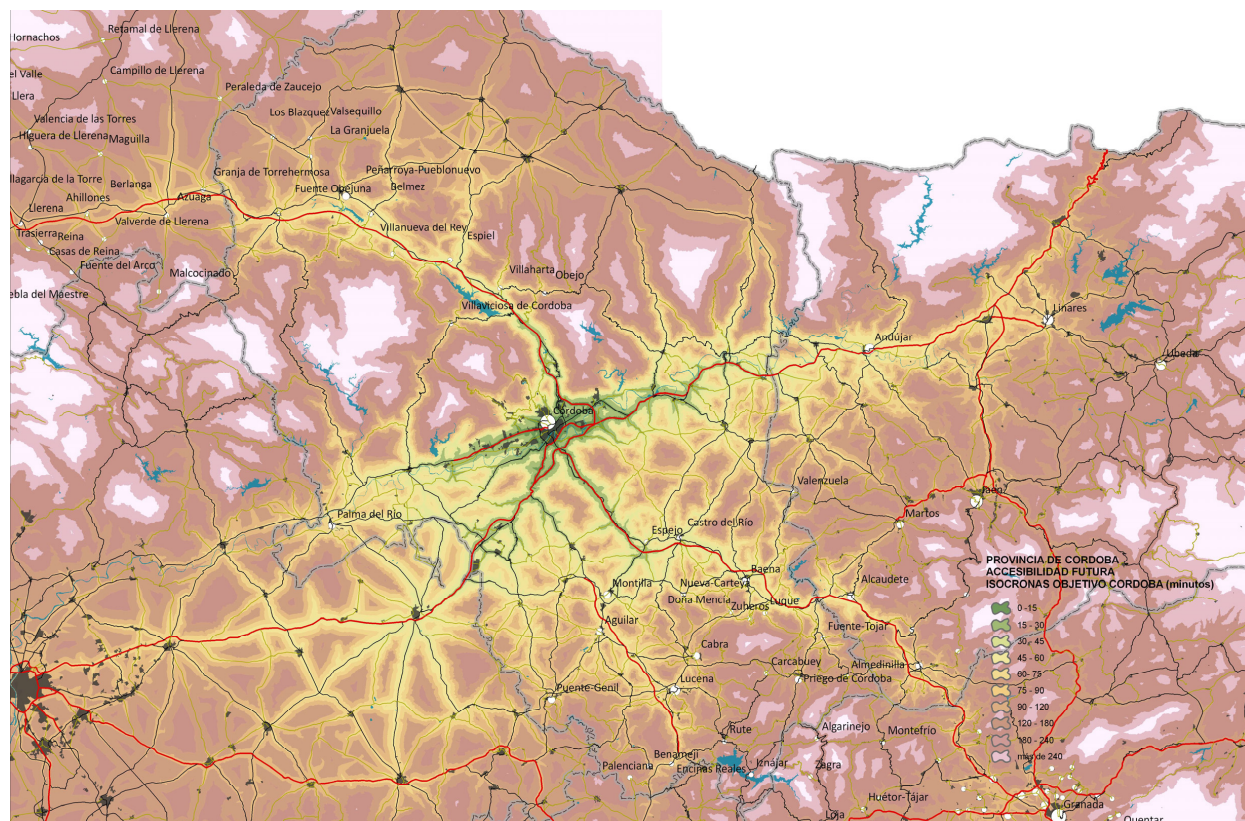


FIGURA 3.97. Red viaria actual, núcleos e isocronas de accesibilidad externa con objetivo Córdoba.

FIGURA 3.98. Actuaciones previstas, objetivos e isocronas de accesibilidad externa futura con objetivo Córdoba.



futura, en las que comparativamente se pueden apreciar los cambios que se producirán en la accesibilidad de sus respectivos territorios (Figuras 3.93 a 3.100).

De la comparativa entre el estado actual y el futuro escenario, se obtienen los **gradientes de accesibilidad externa** o ganancias en términos de tiempo (minutos) que propician las nuevas infraestructuras. La tabla adjunta, ordenada de mayor a menor mejora, revela los datos obtenidos para cada una de las 177 cabeceras municipales consideradas (Tabla 3.1.).

De igual forma, este indicador vuelve a descubrir como naturalmente, en general, todos los núcleos de la traza son beneficiados por el incremento de accesibilidad, pero de manera particular los del norte de la provincia de Córdoba, como Fuente Obejuna y Villanueva del Rey, y los del sur de la de Badajoz, como Valverde de Llerena y Granja de Torrehermosa, destacando asimismo las mejoras en las poblaciones del suroeste de Jaén de Castillo de Locubín, Alcaudete y Alcalá la Real.

En estos la ganancia total de tiempos se sitúa entre las diez y las once horas de recorrido, como sumatoria de tiempos hacia los nueve objetivos seleccionados (Sevilla –SEV–, salida por la ruta de la Plata –PLT–, Málaga –MAL–, salida hacia Madrid por Mérida –MAD1–, salida hacia Madrid por el paso de Despeñaperros –MAD2–, Jaén –JAEN–, Granada –GRND–, Córdoba –CORD– y Badajoz –BADJ–). (Figura 3.93)

Se adjuntan cartografías de los gradientes total exterior (Figura 3.101) y para cada uno de los nueve objetivos seleccionados. En el caso de tomar como objetivo a Sevilla (Figura 3.102.), las ganancias de tiempos de los recorridos futuros respecto a los actuales se concentran en torno a la traza, principalmente entre los núcleos de Fuente Obejuna, Peñarroya-Pueblonuevo y Villanueva del Rey, por una lado, y entre Alcaudete y Alcalá La Real por otro.

Tomando como objetivo de los desplazamientos la salida por la ruta de la Plata (A-66) al norte de Mérida (Figura 3.103.), se observa cómo los mayores gradientes se concentran de forma similar pero en los tramos entre Espiel y Córdoba y entre Espejo y Alcalá La Real. Considerando como destino Málaga (Figura 3.104.), las mayores ganancias de accesibilidad se producen entre Azuaga - Fuente Obejuna - Peñarroya-Pueblonuevo, y en

menor medida en torno a Alcaudete.

Respecto a la salida hacia Madrid por la A-5 al este de Mérida (Figura 3.105.), los mayores gradientes se distribuyen de manera similar al del objetivo de la ruta de la Plata, en los tramos entre Espiel y Córdoba y entre Espejo y Alcalá La Real. Respecto a la salida hacia Madrid por la A-4 en Despeñaperros (Figura 3.106), los mayores gradientes se concentran al sureste de la provincia de Badajoz entre Llerena y Azuaga.

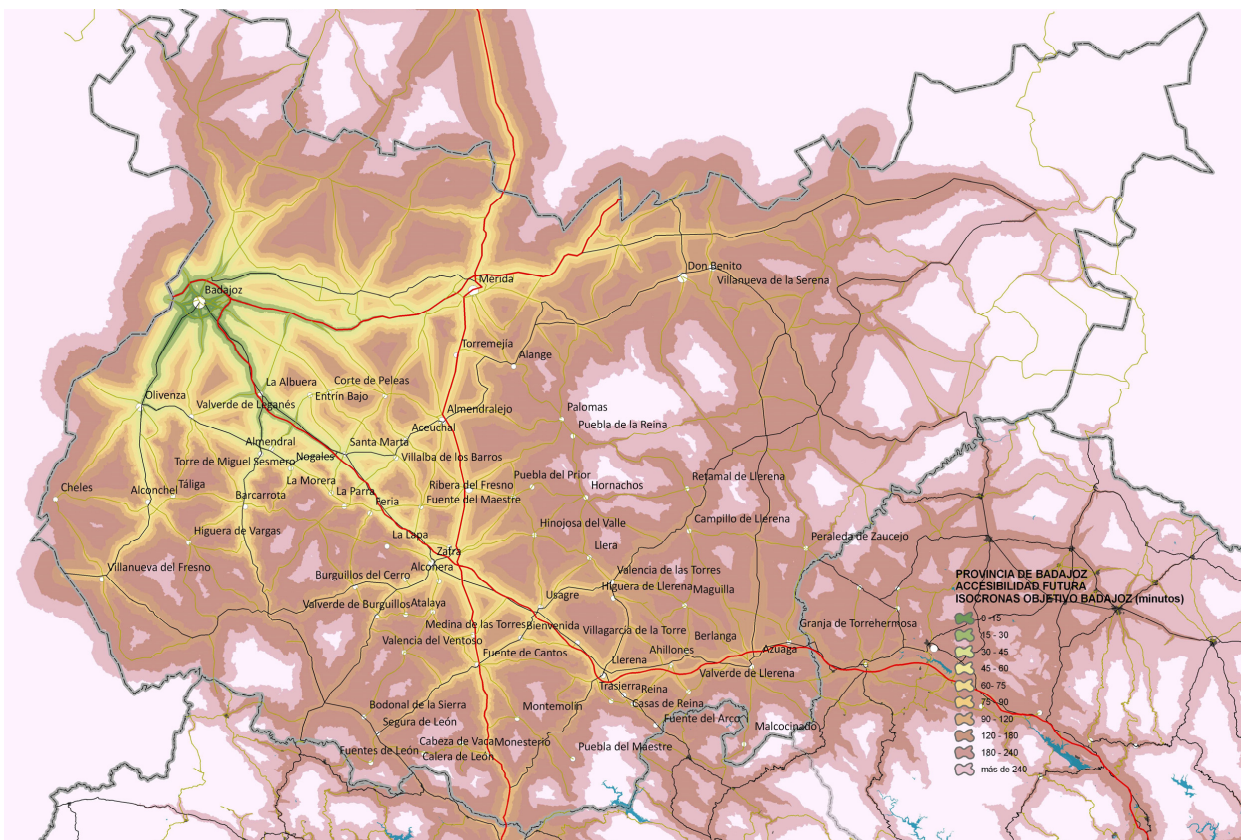
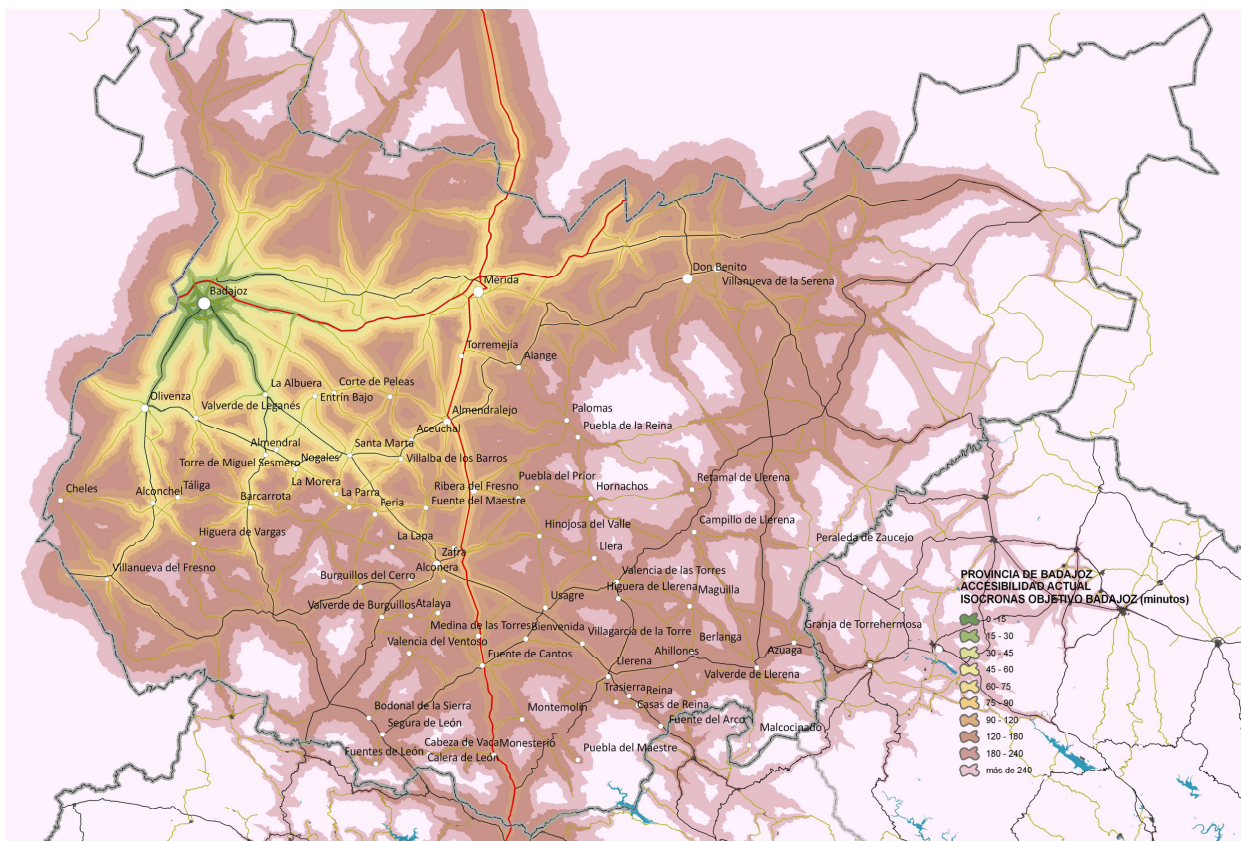
Tomando como objetivo a Jaén (Figura 3.107), las ganancias de tiempos se acentúan ante el sureste de la de la provincia de Badajoz y el noroeste de la de Córdoba, entre Llerena y Peñarroya-Pueblonuevo. Respecto a Granada (Figura 3.108.), la distribución de gradientes es similar al anterior, pero más extendido hacia el noroeste de la provincia de Córdoba y a lo largo de la traza entre Castro del Río y Alcaudete. Considerando Córdoba como objetivo (Figura 3.109.), los mayores gradientes se concentran repartidos en dos sectores en el sureste de la provincia de Badajoz, entre Llerena y Fuente Obejuna, y al suroeste de la de Jaén, entre Alcaudete y Pinos Puente. Por último, respecto a Badajoz (Figura 3.110), en general toda Andalucía se beneficia por ganancias de tiempo, pero principalmente serán todos los núcleos en torno a la traza de las provincias de Córdoba y Jaén.

Asimismo, y para una mayor claridad, se adjuntan cartografías del gradiente de accesibilidad exterior total en las cuatro provincias consideradas, con los valores respectivos en las cabeceras municipales de la mejora de esta (Figuras 3.111, 112, 113 y 114).

(página siguiente)

FIGURA 3.99. Red viaria actual, núcleos e isocronas de accesibilidad externa con objetivo Badajoz

FIGURA 3.100. Actuaciones previstas, objetivos e isocronas de accesibilidad externa futura con objetivo Badajoz



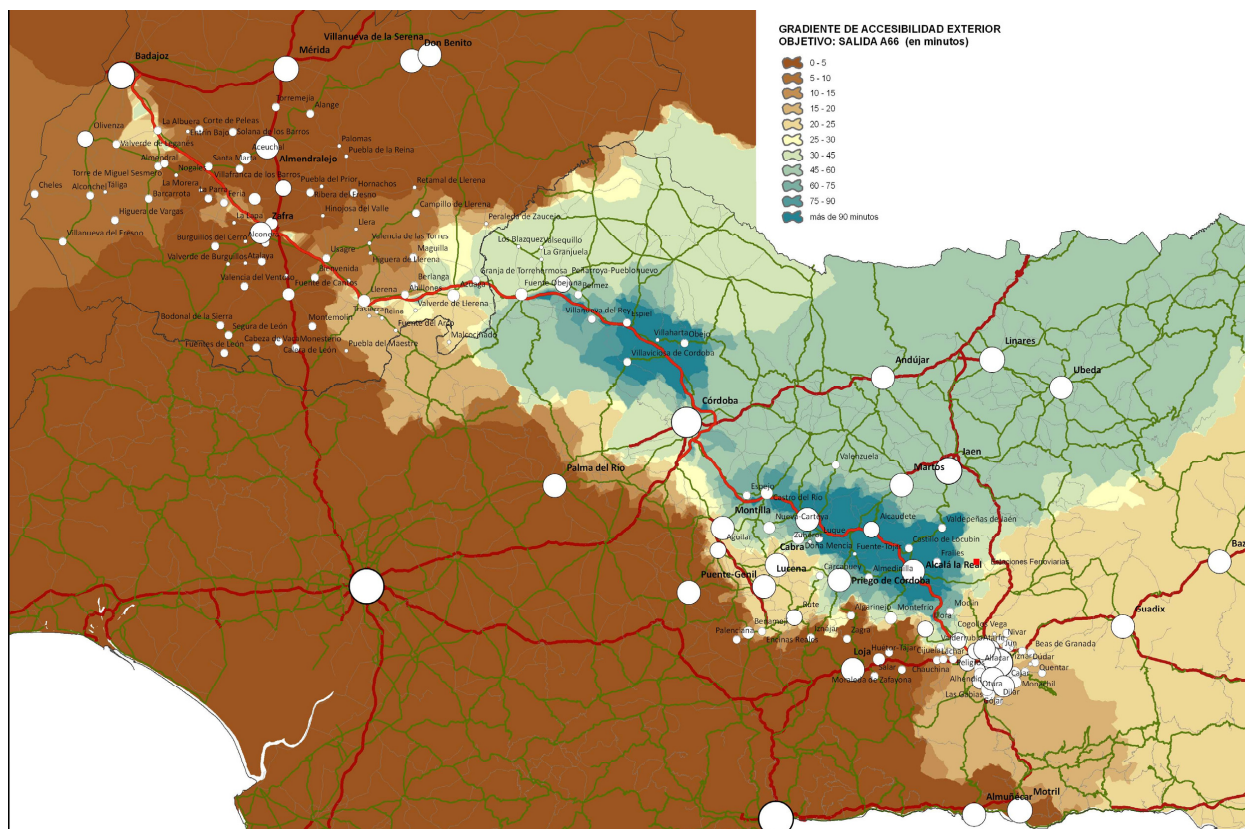
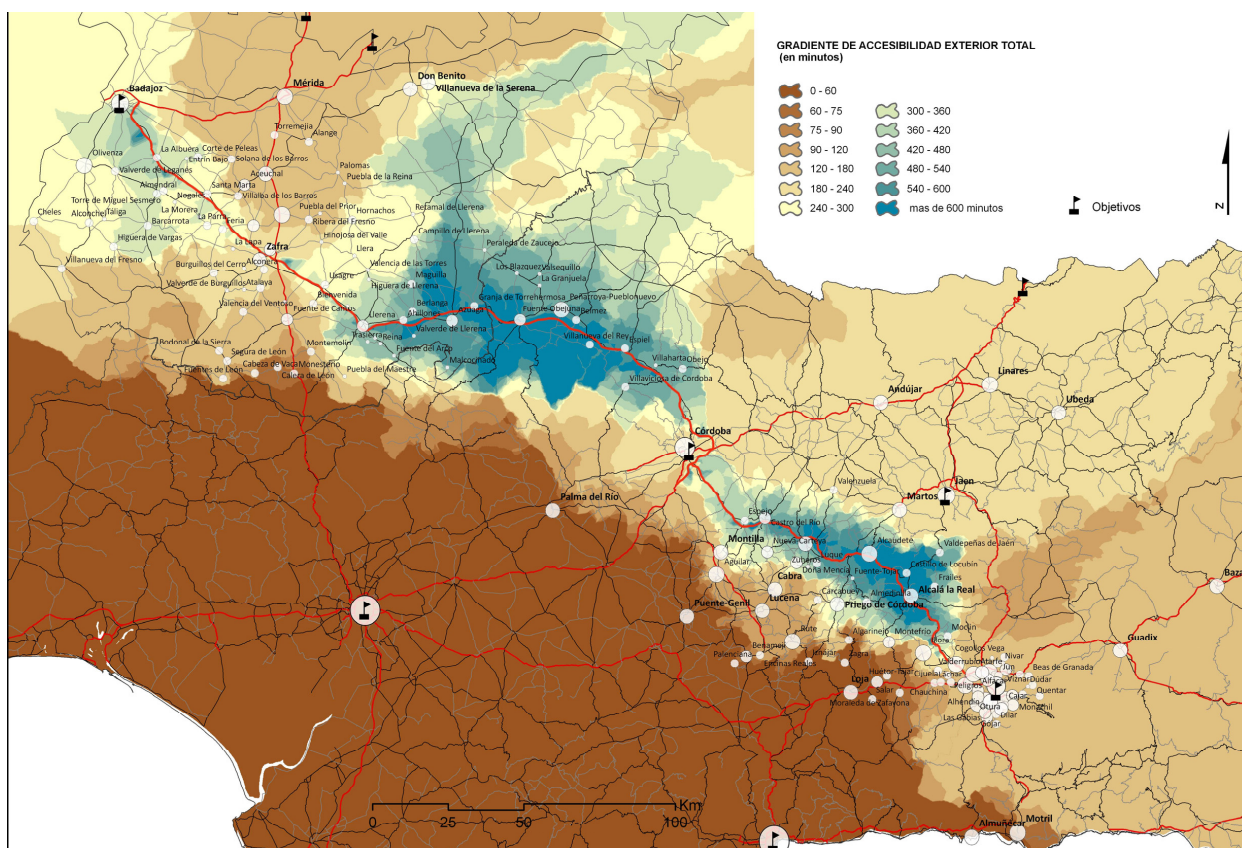
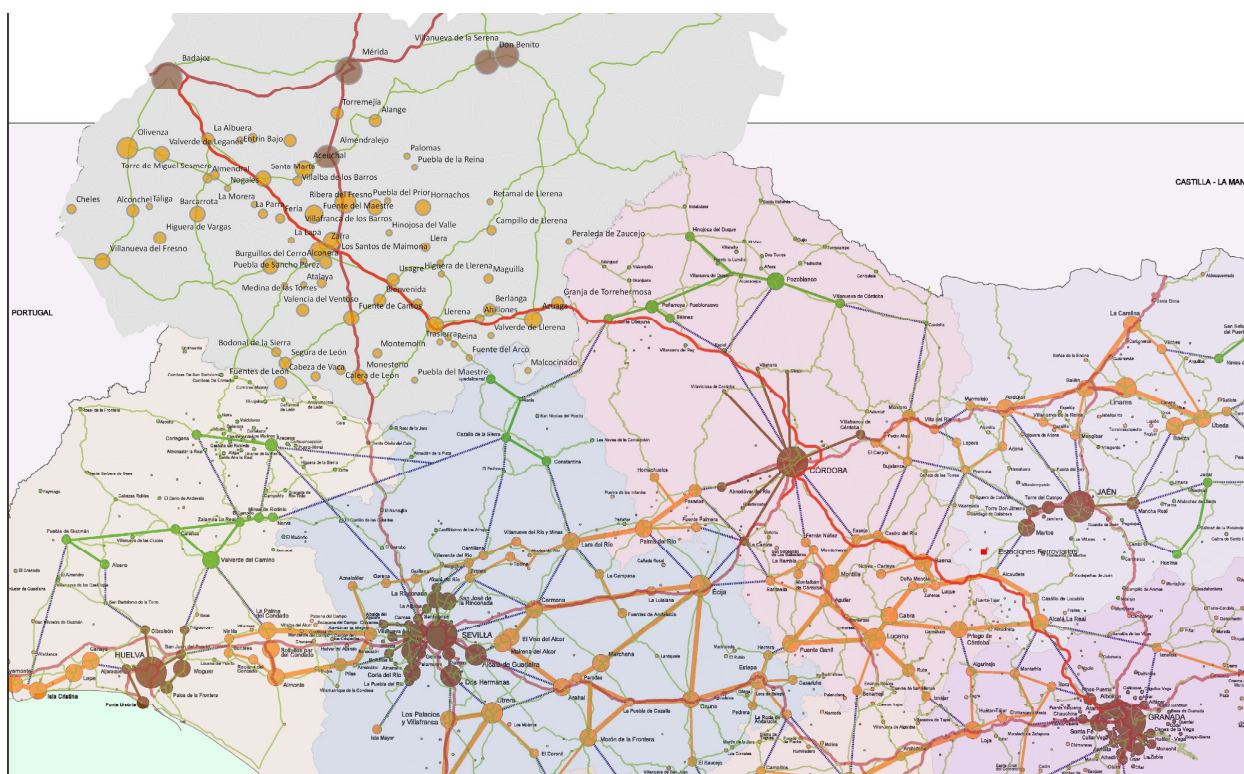


FIGURA 3.101. Gradiente de accesibilidad externa futura total

FIGURA 3.102. Gradiente de accesibilidad externa futura objetivo ruta de la Plata

FIGURA 3.103.



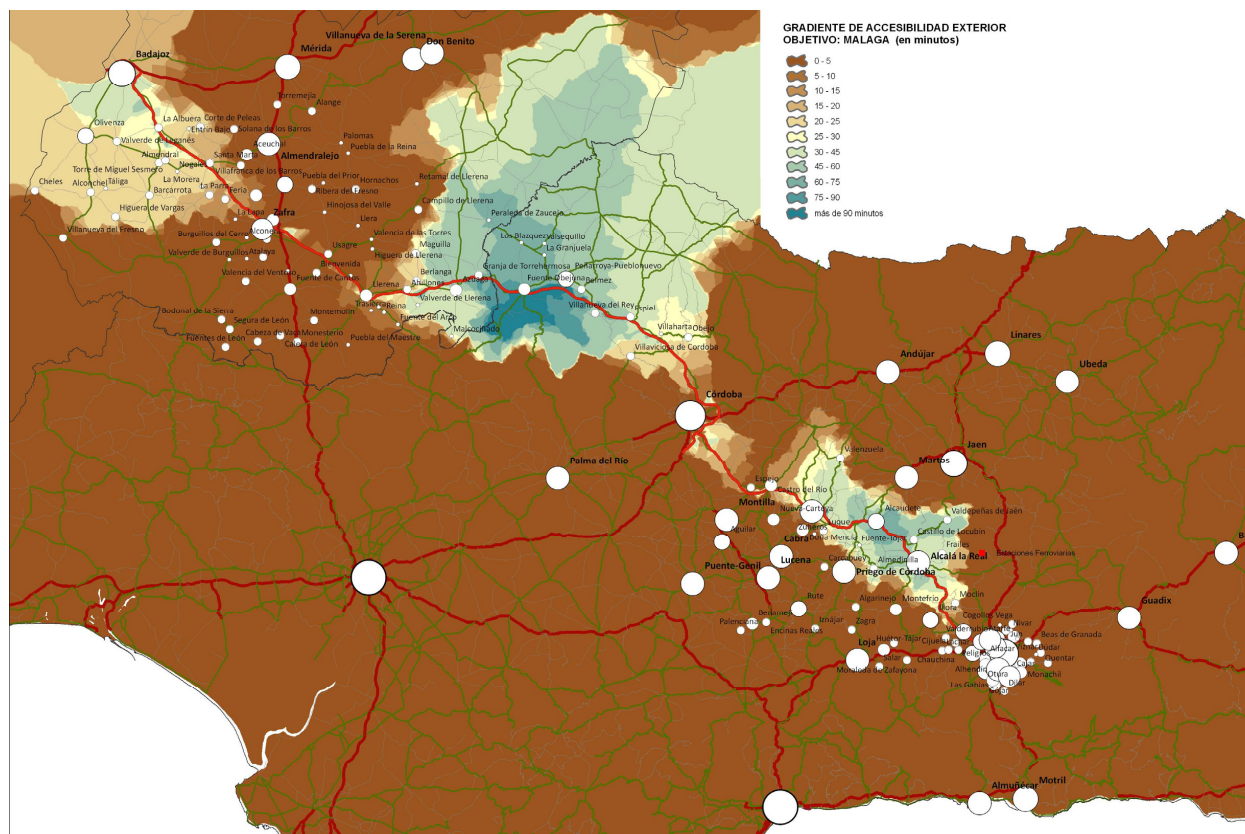
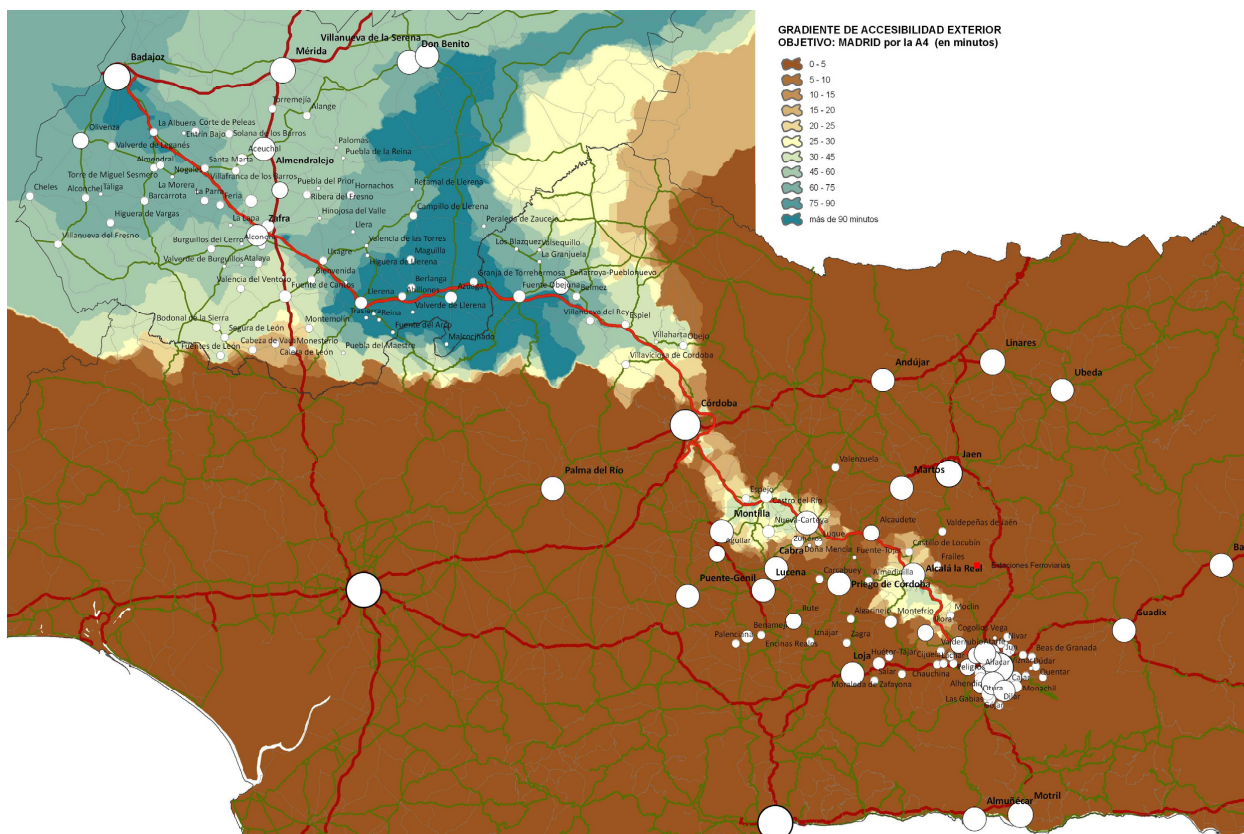
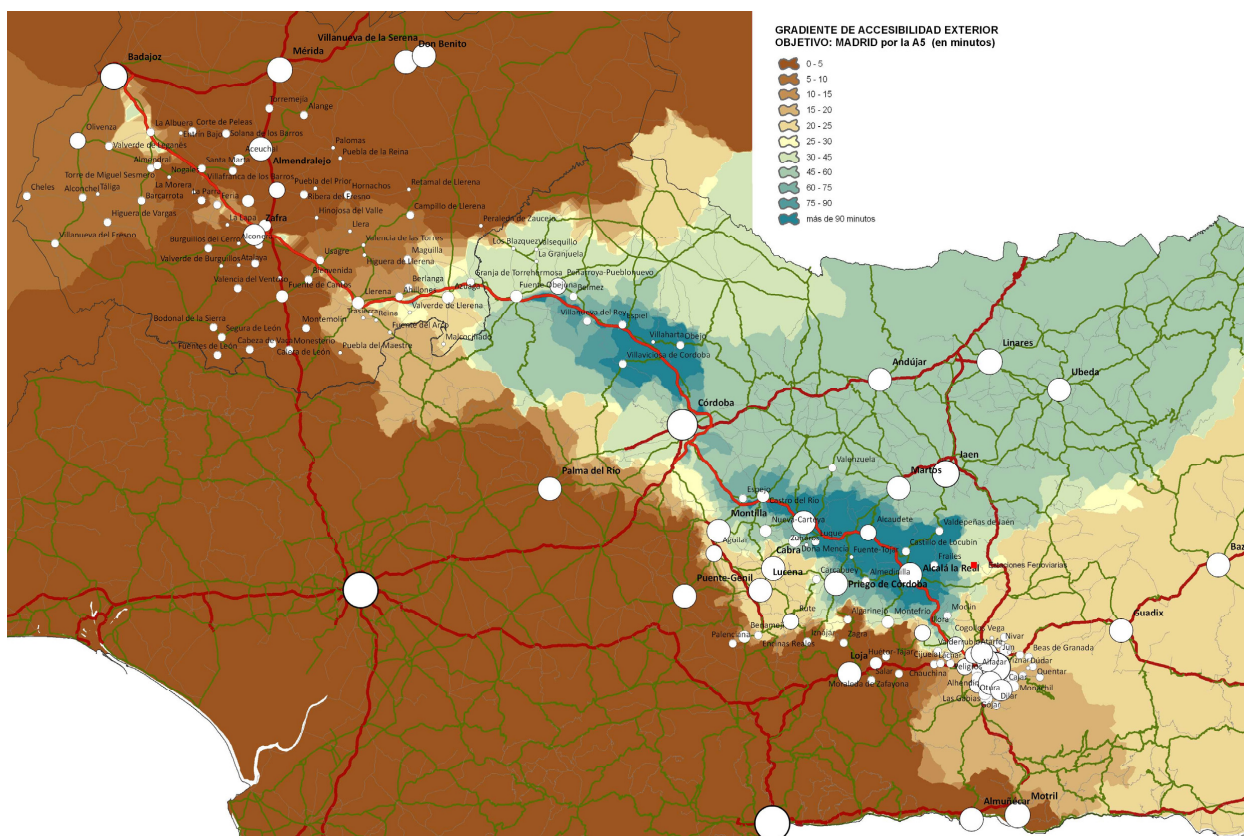


FIGURA 3.104. Gradiente de accesibilidad externa futura objetivo Málaga

(página siguiente)

FIGURA 3.105. Gradiente de accesibilidad externa futura objetivo salida a Madrid por A-5

FIGURA 3.106. Gradiente de accesibilidad externa futura objetivo salida a Madrid por A-4



Impacto de las infraestructuras viarias en los sistemas urbanos.

Los efectos de las futuras condiciones de accesibilidad proporcionada por la nueva autovía sobre los sistemas urbanos se han tenido en cuenta tanto desde el punto de vista de los cambios que se producirán en las áreas de influencia-dependencia o áreas tributarias de los principales núcleos del área en términos de tiempos de recorrido, así como respecto a la incidencia de los incrementos de accesibilidad previstos en los distintos núcleos según su dinámica socioeconómica, estableciéndose como principio general que se producirá una mayor interacción respecto a las ganancias de accesibilidad en aquellos centros con dinámicas socioeconómicas más positivas, lo que hemos denominado “potencial de desarrollo inducido”.

Dado que, según los Estudios Informativos, el futuro trazado de la Autovía discurrirá por el corredor de la actual carretera N-432, coincidiendo con su entorno geográfico y enlazando entre sí a los núcleos urbanos más desarrollados de la zona, donde está la mayor parte de la actividad económica asociada a los desplazamientos por carretera y, por lo tanto, donde la futura autovía captará más tráfico, no se prevén alteraciones significativas en el sistema urbano.

En el tramo Badajoz-Espiel, la alternativa seleccionada sigue, como se ha indicado, el corredor de la carretera N-432, pasando cercana a los núcleos urbanos de La Albuera, Santa Marta, Feria, Zafra, Los Santos de Maimona, Usagre, Villagarcía de la Torre, Llerena, Ahillones, Berlanga, Azuaga y La Granja de Torrehermosa, todos ellos de la provincia de Badajoz y a los de La Coronada, Fuente Obejuna, El Hoyo, Peñarroya-Pueblonuevo, Belmez y Espiel, de la provincia de Córdoba.

En el tramo Espiel-Granada, la alternativa seleccionada sigue igualmente este corredor, pasando cercana a los núcleos urbanos de Espiel, Villaharta, Córdoba, Espejo, Castro del Río, Baena y Luque en la provincia de Córdoba, los de Alcaudete, Castillo de Locubín y Alcalá la Real en la provincia de Jaén, y los de Puerto Lope (Moclín), Pinos Puente, Atarfe y Maracena en la de Granada.

No obstante, como muestra el análisis espacial efectuado, se producirán ligeras alteraciones en las áreas

tributarias de los principales núcleos al modificarse las condiciones de accesibilidad futuras. Así, respecto a los 32 núcleos de población de más de 15.000 habitantes de las provincias de Granada, Jaén, Córdoba y Badajoz considerados para el análisis de la accesibilidad interna -junto a Sevilla-, únicamente cambian de área de influencia-dependencia según los tiempos de desplazamiento a estas, las diez poblaciones que se recogen en la siguiente tabla.

Según esto se incrementa la influencia de Córdoba respecto a las poblaciones relevantes de Badajoz, como Zafra y Villanueva de la Serena, incrementándose así mismo en esta provincia la influencia de Zafra sobre otros núcleos vinculados anteriormente más a Almedralejo. Particularmente, Moclín pasará a relacionarse más con Albolote que con Alcalá la Real y previsiblemente Castro del Río lo hará con Baena más que con Montilla.

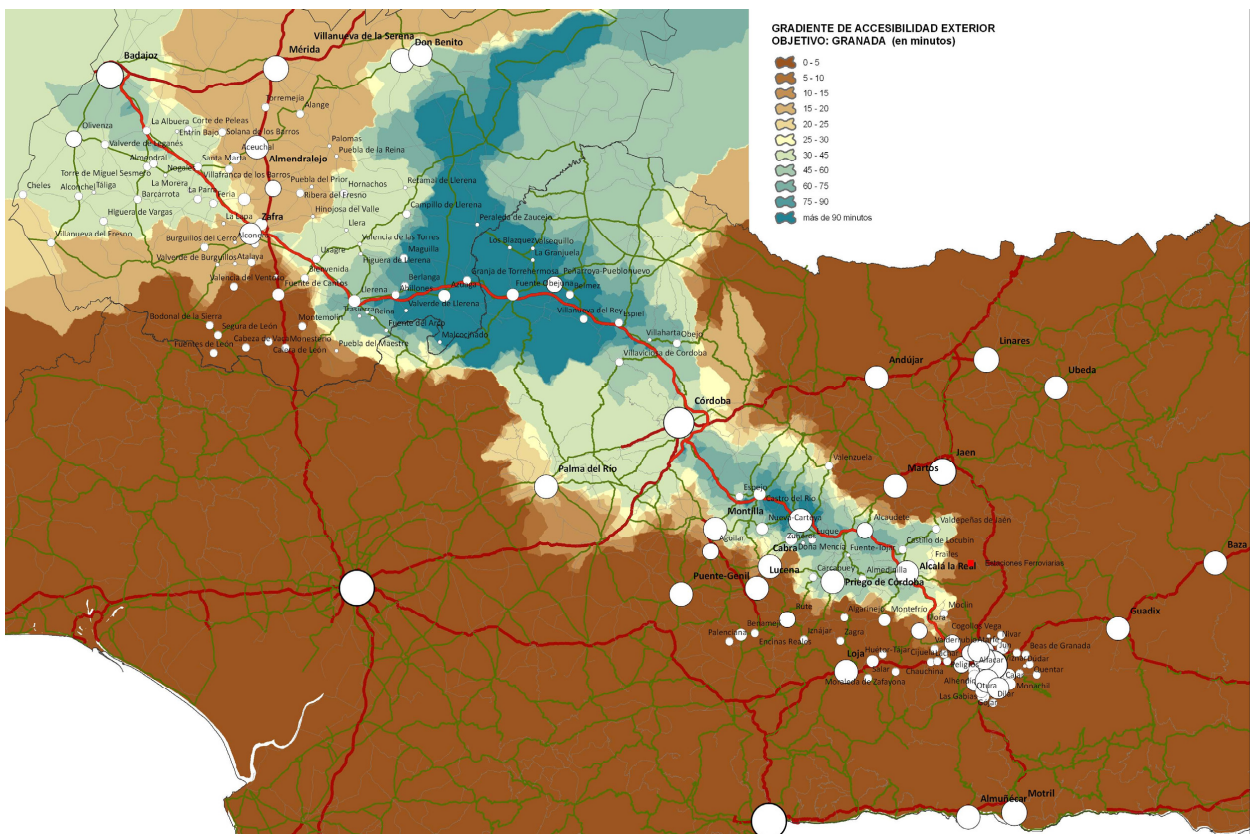
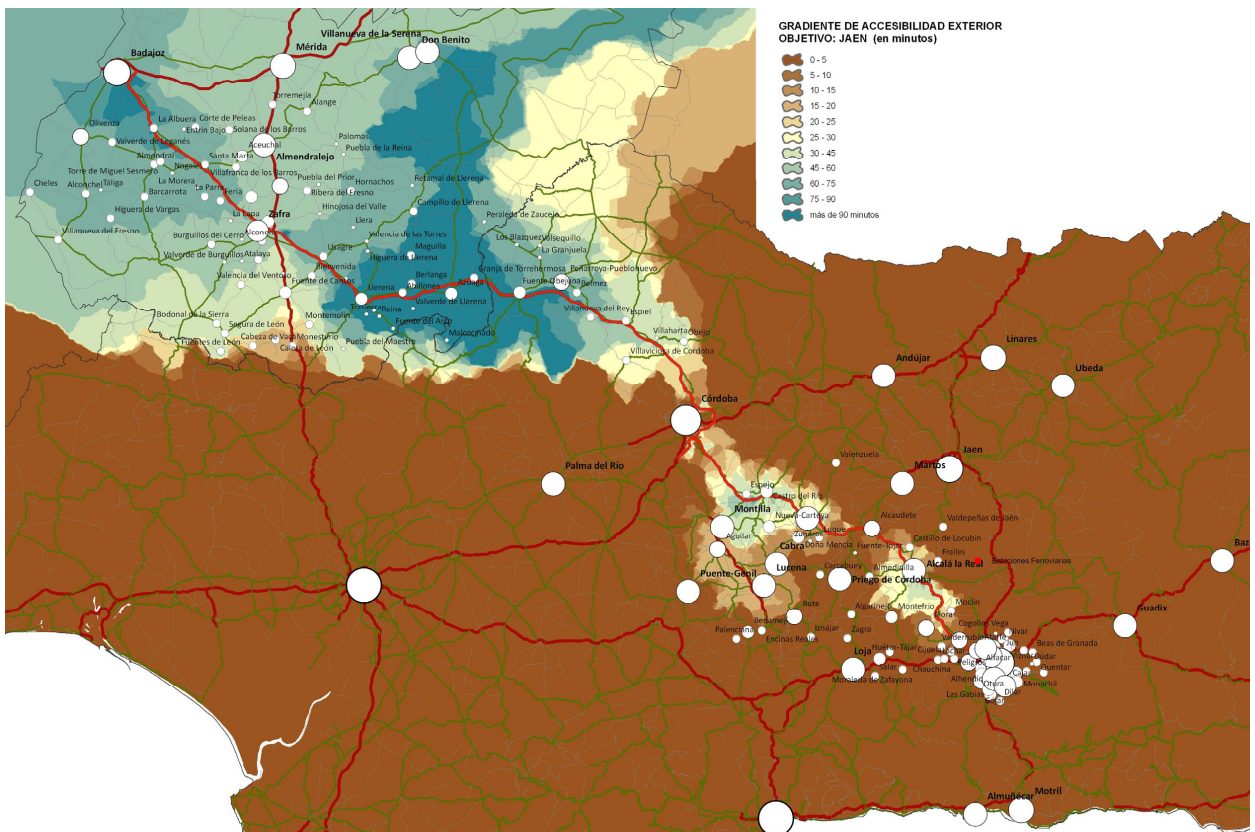
Se adjuntan cartografías de las áreas tributarias de los núcleos principales según tiempos de recorrido a través de la red viaria actual (Figura 3.115) y través de la red viaria futura (Figura 3.116) y los núcleos con cambios de dependencia indicados en azul (Figura 3.117).

Respecto a la interacción entre accesibilidad y dinámicas socioeconómicas, se asimila esta última a la dinámica poblacional actual. Para ello se ha realizado un análisis de esta dinámica poblacional a partir de las series de población que facilita el INE, desde 1996 hasta el 2007 (excepto año 1997) con un índice 100, que representa a lo largo de la serie si una población ha crecido (índice >100) o si ha disminuido (índice <100). Se toma como año de partida o referencia el año 1996 y el año final el 2007, que es el de la población más actual considerada (Figura 3.118).

Como se ha indicado, se obtiene un “potencial de desarrollo inducido” para cada núcleo, derivado de la interacción entre la dinámica poblacional y los cambios de accesibilidad, considerado como la adición del índice

FIGURA 3.107. Gradiente de accesibilidad externa futura objetivo Jaén

FIGURA 3.108. Gradiente de accesibilidad externa futura objetivo Granada



100 y el gradientes de accesibilidad interna (diferencia de tiempos de recorrido de la distancia más corta entre cada uno de los núcleos al centro principal más cercano, con la red viaria actual y la futura), y externa (diferencia de tiempos de recorrido totales entre cada uno de los núcleos municipio hacia el exterior del ámbito de estudio o sus centros principales –los nueve objetivos considerados–, con la red viaria actual y la futura).

Así las poblaciones que podrán aprovechar con mayor intensidad las mejoras de la accesibilidad introducidas por la nueva autovía serán aquellas más dinámicas socioeconómicamente en la actualidad, calificándose este potencial en Muy Alto (> 600), y sucesivamente en Alto (400-600), Medio (300-400) y Bajo (< 200).

Así los municipios que obtienen un potencial muy alto son los de Castillo de Locubín, Fuente Obejuna, Alcaudete, Villanueva del Rey, Alcalá la Real, Espiel, Granja de Torrehermosa, Bélmez, Valverde de Llerena, La Granjuela, Peñarroya-Pueblonuevo o Azuaga. Los dos primeros a pesar de tener dinámicas ligeramente regresivas obtendrán los mayores incrementos de accesibilidad del ámbito, tanto interior como exterior, y los cuatro siguientes, con dinámicas estables, tendrán asimismo importantes incrementos de accesibilidad.

Además, y para una mayor claridad, se adjuntan cartografías del “potencial de desarrollo inducido” en las cuatro provincias consideradas, con el valor correspondiente en las cabeceras municipales (Figuras 3.119 a 3.123)

En las tabla adjuntas se recogen para cada uno de las 177 las cabeceras municipales consideradas municipios estudiados su dinámica poblacional, según el índice 100, su accesibilidad interior (actual y futura) y el correspondiente gradiente de accesibilidad interior y exterior, así como las dependencias de los núcleos principales actual y futura, ordenados según el “potencial de desarrollo inducido”.

FIGURA 3.109. Gradiente de accesibilidad externa futura objetivo Córdoba

FIGURA 3.110. Gradiente de accesibilidad externa futura objetivo Badajoz

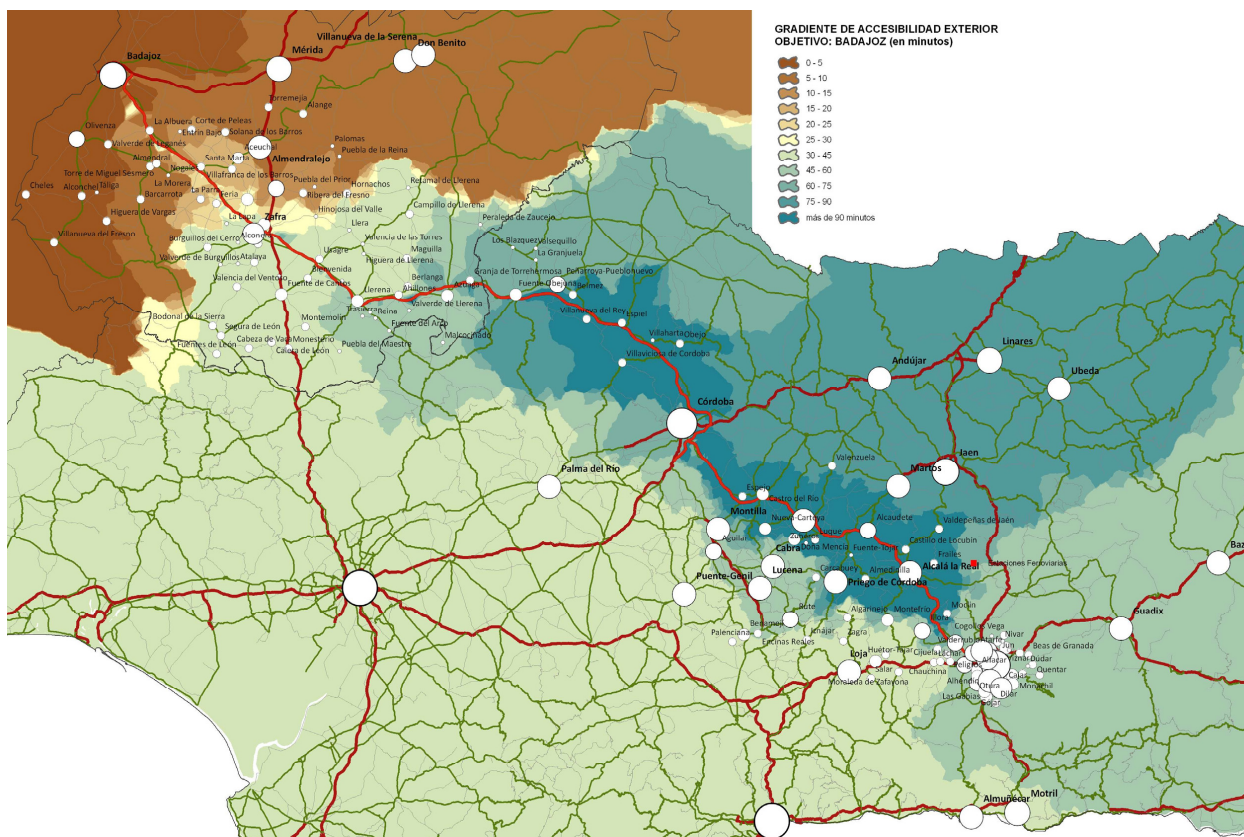
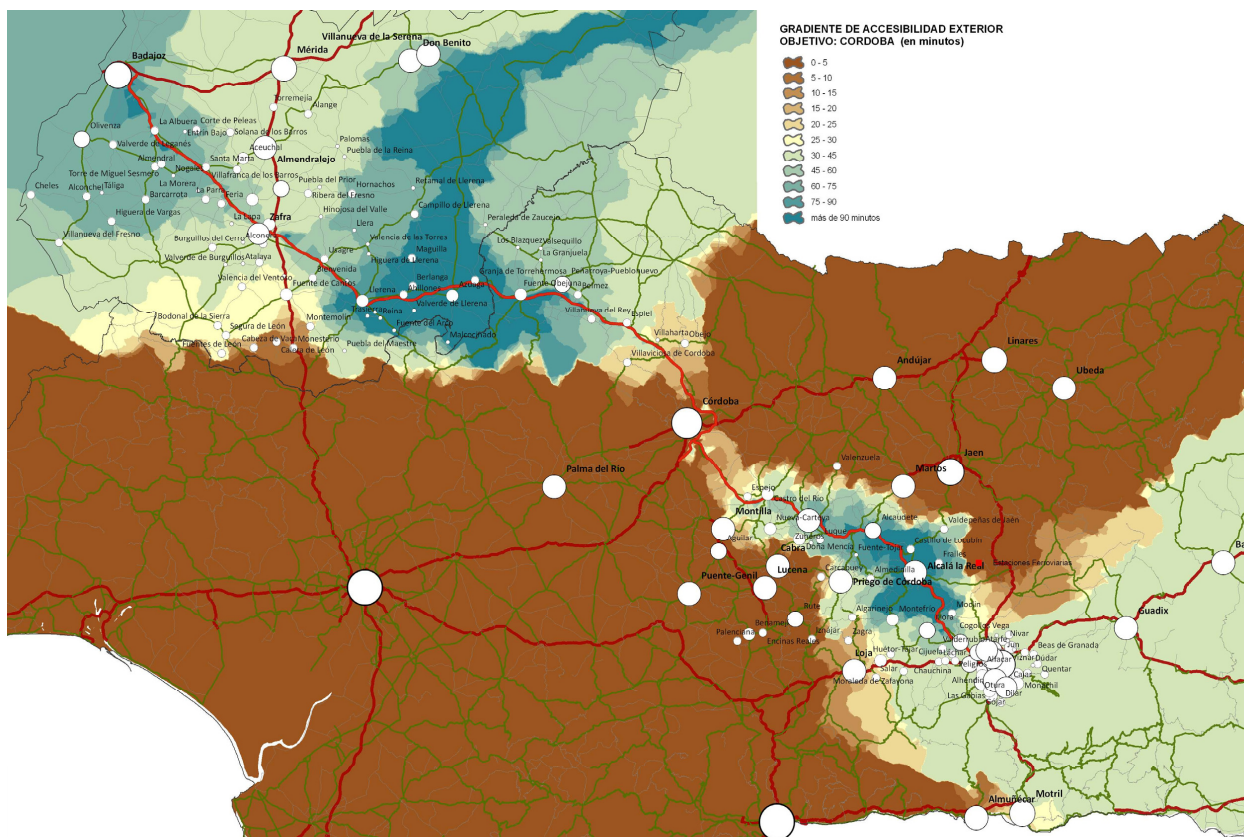
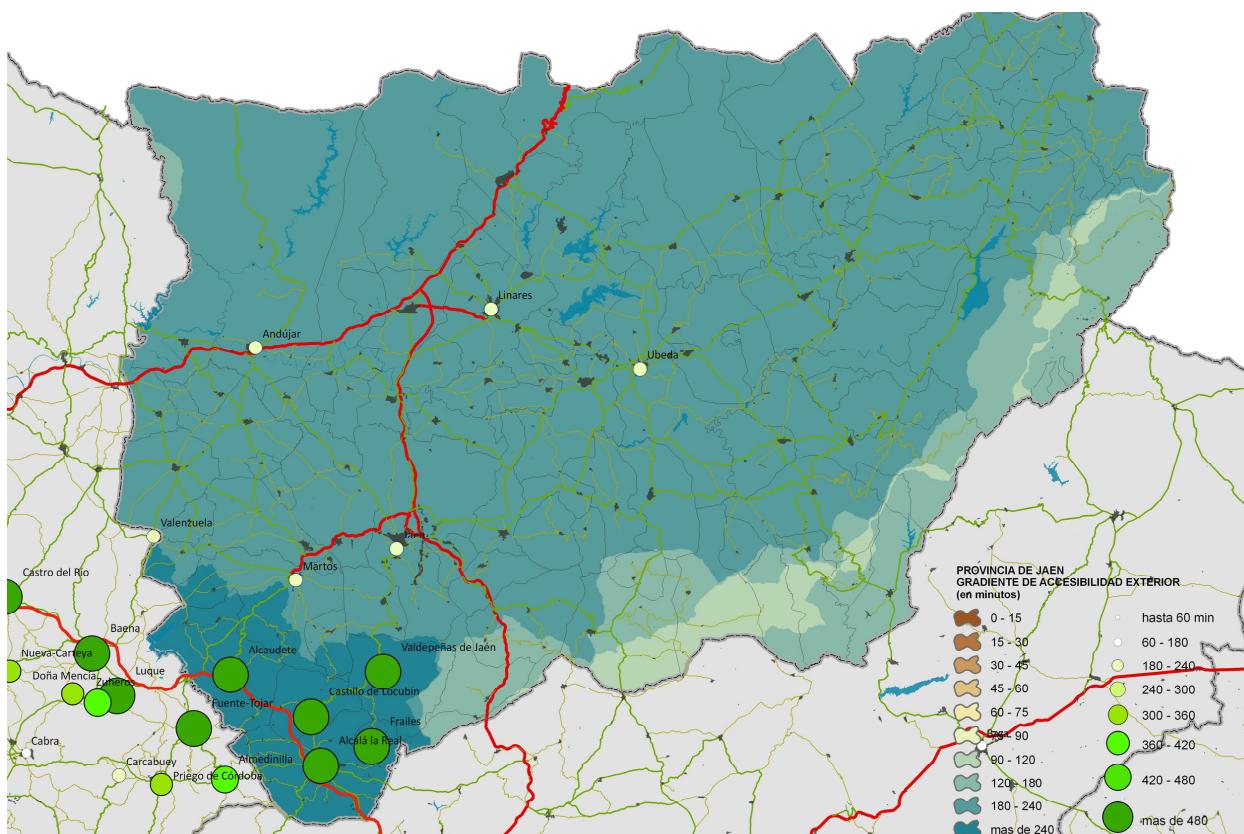
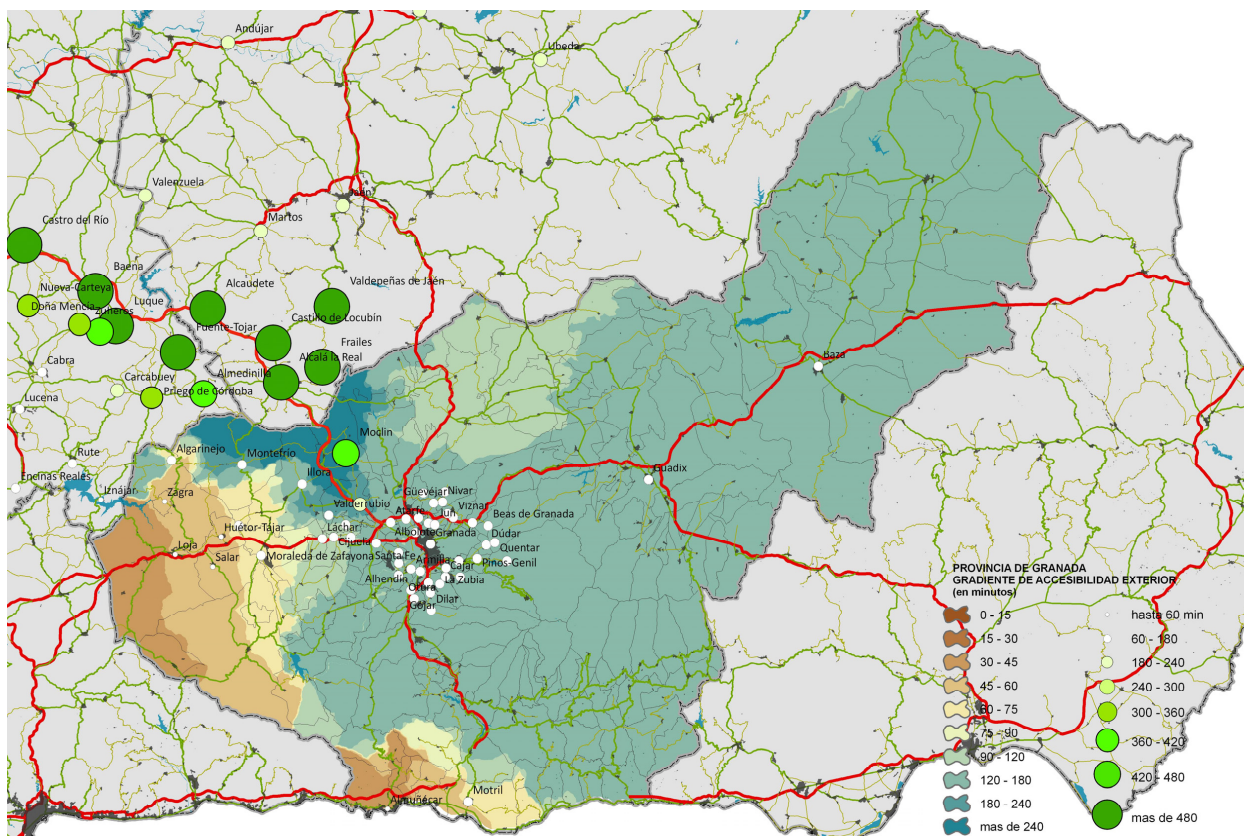


FIGURA 3.111. Gradiente de accesibilidad exterior total provincia de Granada

FIGURA 3.112. Gradiente de accesibilidad exterior total provincia de Jaén



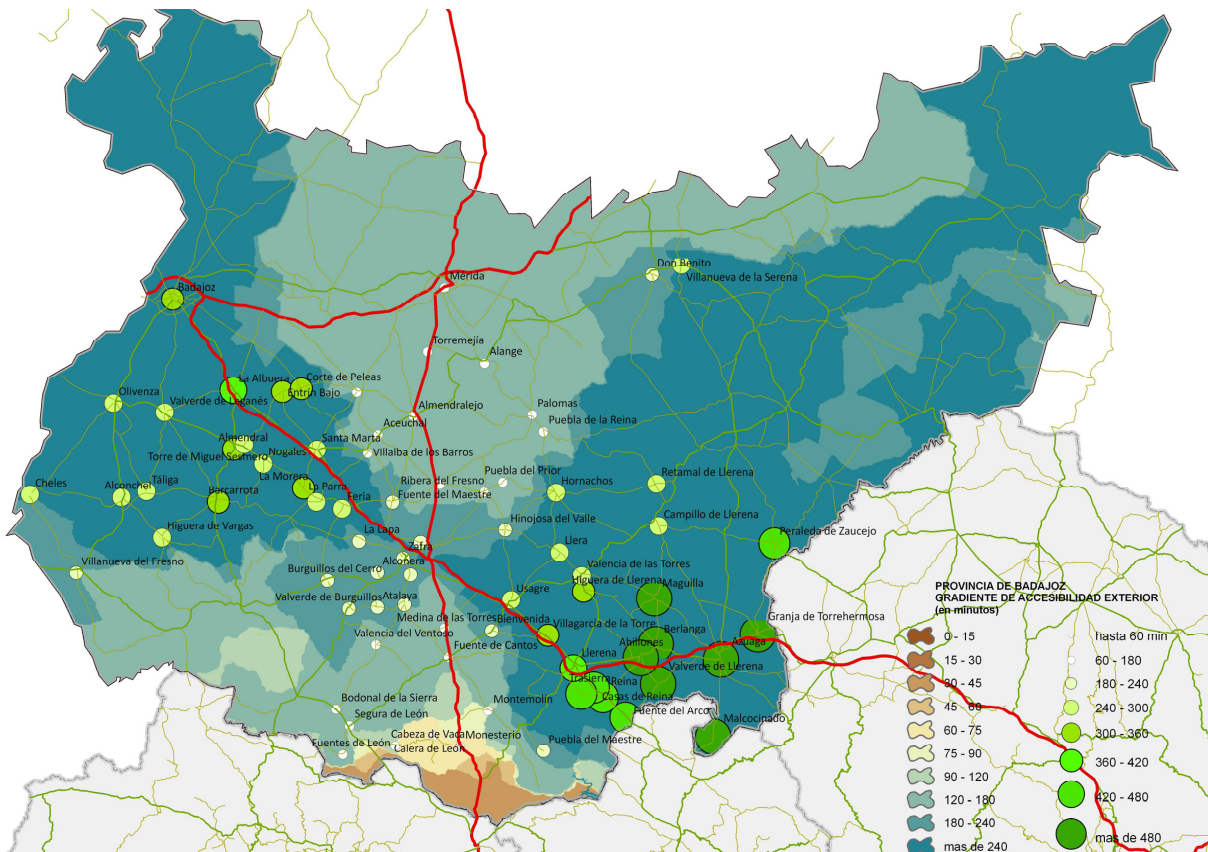
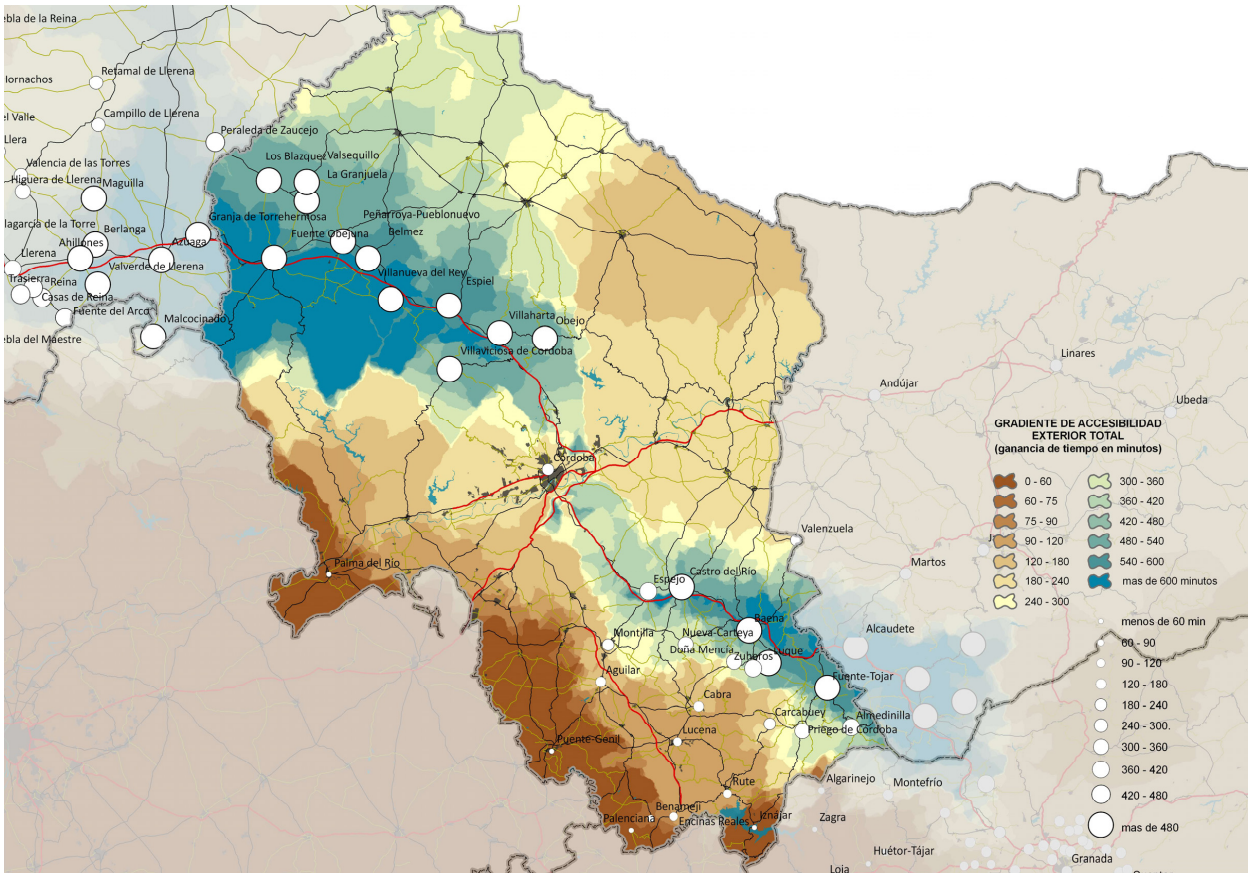


FIGURA 3.113. Gradiente de accesibilidad exterior total provincia de Córdoba

FIGURA 3.114. Gradiente de accesibilidad exterior total provincia de Badajoz

TABLA 3.1. a 3.11. Dinámica poblacional, accesibilidad interior y gradientes de accesibilidad interior y exterior para las cabeceras municipales consideradas a través de la red viaria, dependencias actual y futura, y potencial de desarrollo inducido

Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
1	Castillo de Locubín	4887	86,24	31,4	29,7	1,7	Alcala la Real	Alcala la Real	706,1	794,0
2	Fuente Obejuna	5359	85,84	106,0	57,3	48,7	Zafra	Cordoba	640,4	774,9
3	Alcaudete	11113	97,77	50,0	23,7	26,3	Alcala la Real	Alcala la Real	649,7	773,8
4	Villanueva del Rey	1217	96,66	107,8	55,3	52,5	Cordoba	Cordoba	611,3	760,5
5	Alcalá la Real	22324	103,55	0,0	0,0	0,0	Alcala la Real	Alcala la Real	629,1	732,6
6	Espiel	2447	97,88	83,1	40,3	42,8	Cordoba	Cordoba	586,5	727,2
7	Gr. de Torrehermosa	2406	89,51	83,1	53,5	29,6	Zafra	Zafra	598,2	717,3
8	Belmez	3373	81,97	107,6	53,1	54,5	Cordoba	Cordoba	579,4	715,9
9	Valverde de Llerena	730	82,49	78,0	51,0	27,0	Zafra	Zafra	599,9	709,4
10	La Granjuela	526	101,35	123,7	71,7	52,0	Zafra	Cordoba	538,6	692,0
11	Peñarroya-Pueblon.	11918	86,09	117,9	63,3	54,6	Cordoba	Cordoba	548,2	688,9
12	Azuaga	8501	91,66	76,7	53,6	23,1	Zafra	Zafra	562,0	676,8
13	Los Blazquez	688	96,06	128,2	79,5	48,7	Villanueva Seren	Cordoba	525,4	670,2
14	Baena	21138	112,82	0,0	0,0	0,0	Baena	Baena	554,4	667,2
15	Fuente-Tojar	799	93,02	29,4	29,4	0,0	Priego de Cordob	Priego de Cordob	569,8	662,8

Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
16	Obejo	1824	122,09	90,2	66,6	23,6	Cordoba	Cordoba	509,9	655,6
17	Valsequillo	421	86,27	134,1	82,1	52,0	Zafra	Cordoba	509,4	647,7
18	Villaharta	716	113,83	62,8	39,2	23,6	Cordoba	Cordoba	509,9	647,3
19	Frailes	1775	93,87	52,6	52,6	0,0	Alcala la Real	Alcala la Real	529,9	623,8
20	Maguilla	1078	92,06	90,6	77,2	13,4	Zafra	Zafra	508,6	614,1
21	Castro del Río	8058	100,27	35,5	20,1	15,4	Montilla	Baena	492,9	608,6
22	Berlanga	2546	93,74	61,5	48,1	13,4	Zafra	Zafra	500,3	607,4
23	Luque	3306	96,61	39,2	38,6	0,6	Baena	Baena	509,5	606,7
24	Villaviciosa Cordoba	3587	91,72	84,8	64,6	20,2	Cordoba	Cordoba	493,6	605,5
25	Malcocinado	477	83,68	136,7	113,6	23,1	Zafra	Zafra	495,7	602,5
26	Ahillones	1064	86,50	57,4	42,5	14,9	Zafra	Zafra	492,4	593,8
27	Valdepeñas de Jaén	4224	92,63	70,2	68,5	1,7	Alcala la Real	Alcala la Real	496,1	590,4
28	Trasierra	693	98,72	76,7	61,8	14,9	Zafra	Zafra	423,2	536,8
29	Fuente del Arco	769	91,11	79,3	64,8	14,5	Zafra	Zafra	430,7	536,3
30	Peraleda de Zaucejo	592	85,80	105,9	100,9	5,0	Villanueva Seren	Cordoba	433,9	524,7
31	Reina	186	77,14	68,9	54,4	14,5	Zafra	Zafra	430,7	522,3
32	Llerena	5995	104,62	46,0	33,1	12,9	Zafra	Zafra	404,6	522,1

Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
33	Casas de Reina	173	68,11	53,5	39,0	14,5	Zafra	Zafra	430,5	513,1
34	Moclin	4091	86,27	75,1	56,3	18,8	Alcala la Real	Albolote	403,5	508,6
35	Zuheros	812	87,31	37,8	37,8	0,0	Baena	Baena	419,7	507,0
36	Almedinilla	2510	97,59	25,4	25,4	0,0	Priego de Cordob	Priego de Cordob	403,0	500,6
37	Espejo	3651	90,80	24,7	24,7	0,0	Montilla	Montilla	405,0	495,8
38	La Albuera	1856	102,83	25,6	18,2	7,4	Badajoz	Badajoz	362,4	472,6
39	Badajoz	145257	118,57	0,0	0,0	0,0	Badajoz	Badajoz	353,9	472,5
40	Nueva-Carteya	5567	96,03	30,4	30,4	0,0	Montilla	Montilla	343,2	439,2
41	Priego de Córdoba	22999	105,83	0,0	0,0	0,0	Priego de Cordob	Priego de Cordob	332,0	437,8
42	Doña Mencía	5002	99,90	37,4	37,4	0,0	Baena	Baena	334,5	434,4
43	Villagarcía de la Torre	992	93,94	40,6	32,2	8,4	Zafra	Zafra	330,4	432,7
44	La Morera	761	98,58	52,2	44,1	8,1	Almendralejo	Zafra	318,0	424,7
45	Entrín Bajo	601	87,87	50,2	40,2	10,0	Badajoz	Badajoz	312,6	410,5
46	Barcarrota	3664	93,04	64,7	55,2	9,5	Badajoz	Badajoz	306,6	409,1
47	Corte de Peleas	1257	95,81	60,5	50,5	10,0	Badajoz	Badajoz	301,8	407,6
48	Valverde de Leganés	4006	108,12	43,4	43,4	0,0	Badajoz	Badajoz	297,8	405,9
49	Torre de M. Sesmero	1232	96,63	40,6	31,1	9,5	Badajoz	Badajoz	299,0	405,1

Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
50	Olivenza	11652	110,98	30,6	30,6	0,0	Badajoz	Badajoz	293,4	404,4
51	Higuera de Llerena	378	76,36	48,9	43,1	5,8	Zafra	Zafra	320,7	402,9
52	Almendral	1273	85,21	39,9	30,4	9,5	Badajoz	Badajoz	306,6	401,3
53	Feria	1369	96,95	38,8	29,8	9,0	Zafra	Zafra	290,1	396,1
54	Táliga	791	102,33	74,7	74,7	0,0	Badajoz	Badajoz	293,1	395,4
55	Llera	953	91,90	58,5	52,7	5,8	Zafra	Zafra	293,6	391,3
56	Higuera de Vargas	2160	91,53	96,0	96,0	0,0	Badajoz	Badajoz	297,3	388,8
57	La Parra	1405	99,01	60,9	49,0	11,9	Zafra	Zafra	277,7	388,6
58	Campillo de Llerena	1562	85,36	75,7	69,9	5,8	Zafra	Zafra	295,2	386,4
59	Vegas del Genil	7224	262,40	10,8	10,8	0,0	Maracena	Maracena	121,4	383,8
60	Nogales	692	84,80	41,3	36,0	5,3	Almendralejo	Zafra	292,0	382,1
61	Cheles	1294	93,84	114,7	114,7	0,0	Badajoz	Badajoz	288,1	381,9
62	Valencia de las Torres	710	80,87	46,6	40,7	5,9	Zafra	Zafra	293,6	380,4
63	Santa Marta	4310	105,53	24,8	23,7	1,1	Almendralejo	Zafra	272,3	378,9
64	Alconchel	1970	83,94	52,3	52,3	0,0	Badajoz	Badajoz	293,3	377,2
65	Retamal de Llerena	491	81,29	72,9	72,9	0,0	Villanueva Seren	Villanueva Seren	286,5	367,8
66	Hornachos	3829	102,63	97,8	97,8	0,0	Almendralejo	Almendralejo	263,2	365,8

Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
67	Usagre	1985	93,50	31,8	26,0	5,8	Zafra	Zafra	263,8	363,1
68	Villanueva Serena	25318	106,23	0,0	0,0	0,0	Villanueva Seren	Villanueva Seren	251,2	357,4
69	Cullar Vega	6212	233,89	11,4	11,4	0,0	Armillá	Armillá	121,3	355,2
70	Valenzuela	1355	91,91	56,2	55,1	1,1	Baena	Baena	238,2	331,2
71	Fuente del Maestre	6920	100,64	34,4	32,6	1,8	Zafra	Zafra	223,1	325,5
72	Don Benito	34540	109,76	0,0	0,0	0,0	Don Benito	Don Benito	213,1	322,9
73	Pinos-Puente	13540	102,00	16,9	11,2	5,7	Albolote	Albolote	213,1	320,8
74	Bienvenida	2343	98,82	27,8	23,9	3,9	Zafra	Zafra	217,4	320,1
75	Montilla	23650	103,05	0,0	0,0	0,0	Montilla	Montilla	211,2	314,3
76	Las Gabias	13950	184,13	6,5	6,5	0,0	Armillá	Armillá	122,1	306,2
77	Córdoba	323600	105,67	0,0	0,0	0,0	Cordoba	Cordoba	199,3	305,0
78	Martos	24141	108,22	0,0	0,0	0,0	Martos	Martos	194,7	302,9
79	Los Santos Maimona	8087	101,04	20,1	19,9	0,2	Zafra	Zafra	199,9	301,1
80	Zafra	16014	107,59	0,0	0,0	0,0	Zafra	Zafra	190,7	298,3
81	Jaen	116393	111,09	0,0	0,0	0,0	Jaen	Jaen	180,7	291,8
82	Alconera	735	98,79	17,4	17,4	0,0	Zafra	Zafra	191,0	289,8
83	Ubeda	34347	107,05	0,0	0,0	0,0	Ubeda	Ubeda	180,6	287,6

Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
84	Villanueva del Fresno	3610	104,67	78,3	78,3	0,0	Badajoz	Badajoz	182,6	287,3
85	Hinojosa del Valle	555	90,10	59,3	57,6	1,7	Zafra	Zafra	195,2	287,0
86	Valderrubio	2087	102,00	28,5	22,0	6,5	Albolote	Albolote	178,1	286,6
87	Burguillos del Cerro	3238	95,07	32,3	32,3	0,0	Zafra	Zafra	190,6	285,7
88	Puebla de S. Pérez	2884	94,46	16,3	16,3	0,0	Zafra	Zafra	190,3	284,8
89	Aceuchal	5583	107,34	11,3	11,3	0,0	Almendralejo	Almendralejo	177,2	284,5
90	Peligros	10597	151,75	6,5	6,5	0,0	Maracena	Maracena	132,1	283,9
91	Andújar	38769	102,82	0,0	0,0	0,0	Andujar	Andujar	180,7	283,5
92	Almendralejo	31072	114,20	0,0	0,0	0,0	Almendralejo	Almendralejo	169,2	283,4
93	Linares	61262	101,63	0,0	0,0	0,0	Linares	Linares	180,7	282,3
94	Ogijares	12145	159,56	8,8	8,8	0,0	Armillá	Armillá	122,1	281,7
95	Güevéjar	2234	148,74	17,6	17,6	0,0	Albolote	Albolote	132,7	281,4
96	Cenes de la Vega	6363	158,84	20,2	20,2	0,0	Armillá	Armillá	122,1	280,9
97	Villafranca los Barros	13084	105,59	17,0	17,0	0,0	Almendralejo	Almendralejo	175,3	280,9
98	Carcabuey	2752	95,32	32,9	32,9	0,0	Priego de Cordob	Priego de Cordob	185,5	280,8
99	Churriana de la Vega	10228	158,38	5,6	5,6	0,0	Armillá	Armillá	122,4	280,8
100	Jun	2377	153,06	15,8	15,8	0,0	Maracena	Maracena	127,5	280,6

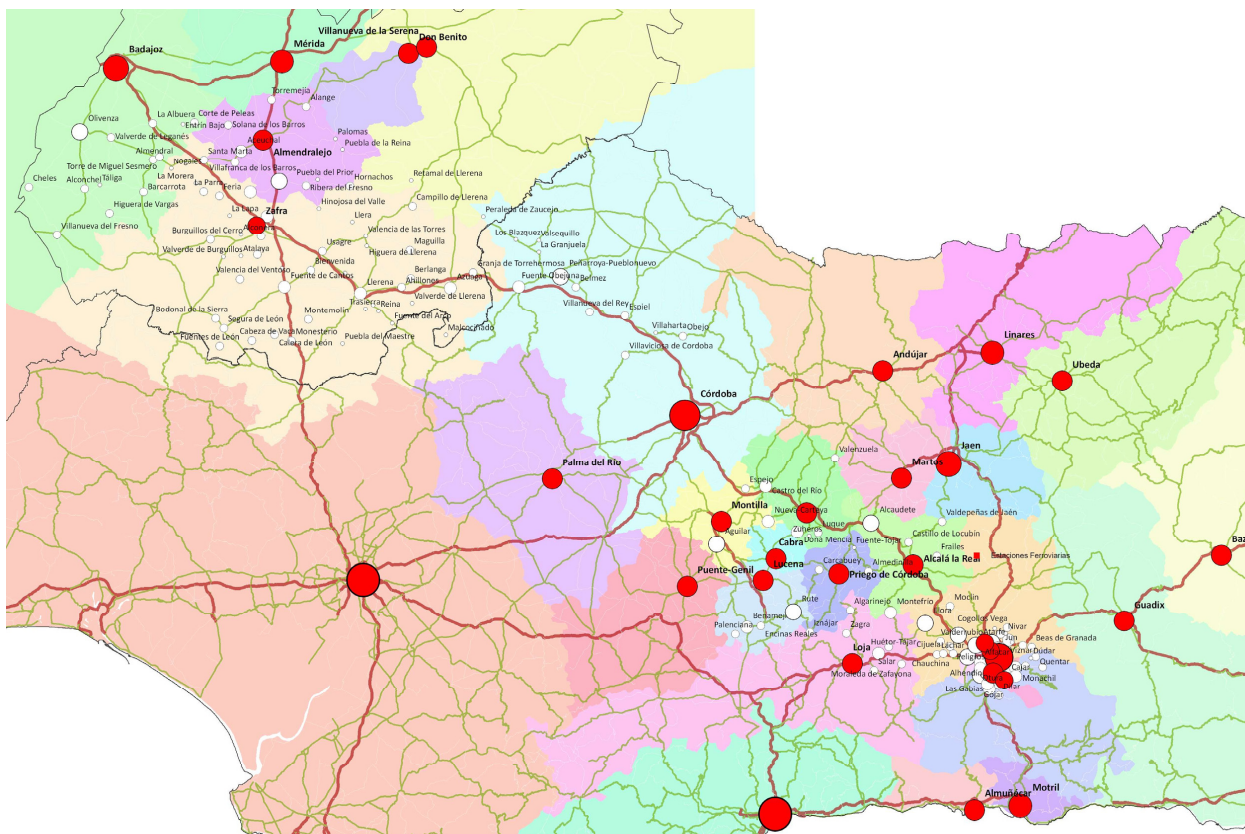
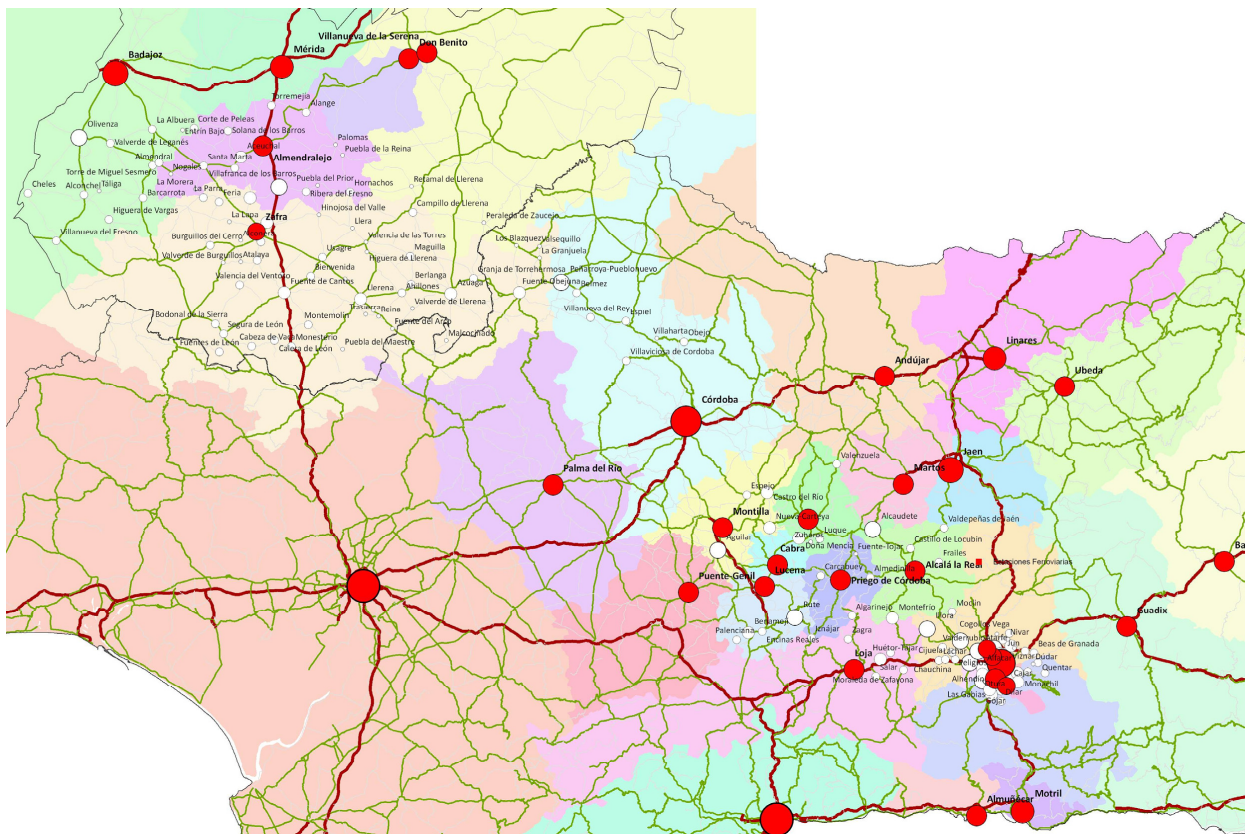
Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
101	Otura	5853	158,13	12,3	12,3	0,0	Armillá	Armillá	122,4	280,5
102	Atalaya	339	89,92	43,0	43,0	0,0	Zafra	Zafra	190,6	280,5
103	Gójar	4964	157,09	16,9	16,9	0,0	Armillá	Armillá	122,3	279,4
104	Armillá	20115	156,43	0,0	0,0	0,0	Armillá	Armillá	122,4	278,8
105	Pulianas	4954	148,55	10,2	10,2	0,0	Maracena	Maracena	129,7	278,3
106	Cajar	4318	156,00	11,0	11,0	0,0	Armillá	Armillá	122,3	278,3
107	La Lapa	302	85,80	63,2	63,2	0,0	Zafra	Zafra	191,8	277,6
108	Medina de las Torres	1370	86,22	31,2	31,2	0,0	Zafra	Zafra	189,7	275,9
109	Torremejía	2178	107,98	12,1	12,1	0,0	Almendralejo	Almendralejo	167,5	275,5
110	Villalba de los Barros	1689	96,62	19,3	19,3	0,0	Almendralejo	Almendralejo	177,2	273,8
111	Mérida	54894	105,91	0,0	0,0	0,0	Merida	Merida	167,8	273,7
112	Puebla del Maestre	798	81,85	90,0	85,5	4,5	Zafra	Zafra	186,7	273,0
113	Atarfe	14144	134,50	7,9	7,9	0,0	Albolote	Albolote	137,1	271,6
114	Illora	10390	96,23	39,4	32,9	6,5	Albolote	Albolote	167,4	270,1
115	Valverde Burguillos	319	78,77	30,6	30,6	0,0	Zafra	Zafra	191,0	269,8
116	Solana de los Barros	2819	97,98	42,7	42,7	0,0	Almendralejo	Almendralejo	171,4	269,4
117	Ribera del Fresno	3234	93,93	39,5	39,5	0,0	Almendralejo	Almendralejo	175,3	269,2

Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
118	Cijuela	2455	164,21	12,7	12,7	0,0	Albolote	Albolote	103,8	268,0
119	Alange	2033	100,10	54,6	54,6	0,0	Almendralejo	Almendralejo	167,5	267,6
120	Puebla del Prior	552	91,69	52,3	52,3	0,0	Almendralejo	Almendralejo	175,5	267,2
121	Palomas	703	99,29	79,5	79,5	0,0	Almendralejo	Almendralejo	167,7	267,0
122	Albolote	16450	132,08	0,0	0,0	0,0	Albolote	Albolote	133,7	265,8
123	Montefrío	6400	86,18	63,0	62,9	0,1	Alcalá la Real	Alcalá la Real	178,9	265,2
124	La Zubia	16941	142,52	0,0	0,0	0,0	La Zubia	La Zubia	122,4	264,9
125	Maracena	19659	139,47	0,0	0,0	0,0	Maracena	Maracena	125,1	264,6
126	Puebla de la Reina	860	96,20	83,6	83,6	0,0	Almendralejo	Almendralejo	167,7	263,9
127	Alhendín	5755	140,13	6,7	6,7	0,0	Armillá	Armillá	122,4	262,5
128	Alfacar	5316	126,24	12,0	12,0	0,0	Albolote	Albolote	132,7	258,9
129	Huétor-Vega	10900	136,52	18,8	18,8	0,0	Armillá	Armillá	122,1	258,6
130	Nívar	785	121,52	36,0	35,9	0,1	Albolote	Albolote	132,9	254,5
131	Monachil	6270	123,57	30,9	30,9	0,0	Armillá	Armillá	122,4	246,0
132	Santa Fe	14934	120,93	10,6	10,6	0,0	Maracena	Maracena	123,9	244,8
133	Baza	22718	109,83	0,0	0,0	0,0	Baza	Baza	133,0	242,8
134	Beas de Granada	1087	107,94	24,8	24,7	0,1	Albolote	Albolote	133,4	241,4

Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
135	Viznar	797	107,41	13,4	13,3	0,1	Albolote	Albolote	132,8	240,3
136	Huétor-Santillán	1798	106,58	16,9	16,9	0,0	Albolote	Albolote	133,2	239,8
137	Calzadilla los Barros	848	103,54	20,7	20,7	0,0	Zafra	Zafra	133,2	236,7
138	Cogollos Vega	2068	101,62	45,0	45,0	0,0	Albolote	Albolote	132,6	234,2
139	Fuente Vaqueros	4211	105,96	20,6	20,6	0,0	Albolote	Albolote	127,3	233,3
140	Fuente de Cantos	5092	100,33	22,3	22,3	0,0	Zafra	Zafra	132,6	232,9
141	Guadix	20307	99,99	0,0	0,0	0,0	Guadix	Guadix	132,7	232,7
142	Güejar-Sierra	2986	110,06	65,6	65,6	0,0	Armillá	Armillá	122,3	232,4
143	Pinos-Genil	1252	106,46	23,1	23,1	0,0	Armillá	Armillá	122,3	228,8
144	Chauchina	4537	114,31	11,6	11,6	0,0	Albolote	Albolote	113,7	228,0
145	Dílar	1638	105,31	26,6	26,6	0,0	Armillá	Armillá	122,4	227,7
146	Aguilar	13653	102,39	16,1	16,1	0,0	Montilla	Montilla	123,5	225,9
147	Lucena	40746	117,13	0,0	0,0	0,0	Lucena	Lucena	108,5	225,6
148	Cabra	21087	101,84	0,0	0,0	0,0	Cabra	Cabra	123,5	225,3
149	Segura de León	2170	93,33	54,7	54,7	0,0	Zafra	Zafra	131,6	224,9
150	Dúdar	296	102,42	45,8	45,8	0,0	Armillá	Armillá	122,4	224,8
151	Calicasas	575	92,15	29,3	29,3	0,0	Albolote	Albolote	130,8	223,0

Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
152	Láchar	2910	124,63	14,1	14,1	0,0	Albolote	Albolote	98,2	222,8
153	Valencia del Ventoso	2204	90,14	65,4	65,4	0,0	Zafra	Zafra	132,7	222,8
154	Granada	236207	96,16	0,0	0,0	0,0	Granada	Granada	122,3	218,5
155	Fuentes de León	2600	91,20	86,2	86,2	0,0	Zafra	Zafra	123,2	214,4
156	Quentar	1046	92,24	77,2	77,2	0,0	Armillá	Armillá	122,1	214,3
157	Bodonal de la Sierra	1143	87,52	61,2	61,2	0,0	Zafra	Zafra	124,0	211,5
158	Rute	10269	102,21	39,7	39,7	0,0	Lucena	Lucena	98,0	200,2
159	Encinas Reales	2438	104,50	24,4	24,4	0,0	Lucena	Lucena	92,5	197,0
160	Cabeza de Vaca	1521	91,57	108,1	108,1	0,0	Zafra	Zafra	91,5	183,1
161	Moraleda de Zafayona	3093	113,55	20,8	20,7	0,1	Loja	Loja	66,6	180,3
162	Benamejí	5095	108,82	34,1	34,1	0,0	Lucena	Lucena	69,1	177,9
163	Motril	58501	116,27	0,0	0,0	0,0	Motril	Motril	61,2	177,5
164	Huétor-Tájar	9467	115,86	20,1	20,0	0,1	Loja	Loja	59,3	175,3
165	Villanueva Mesía	2174	113,11	22,0	21,9	0,1	Loja	Loja	62,1	175,3
166	Montemolín	1545	87,54	64,2	64,2	0,0	Zafra	Zafra	87,4	174,9
167	Almuñécar	27076	126,10	0,0	0,0	0,0	Almuñécar	Almuñécar	40,3	166,4

Nº	NOMBRE	POBLAC. 07	DINAMICA INDICE 100	ACC.INT. ACTUAL	ACC.INT. FUTURA	GRAD. INT.	DEPEND. ACTUAL	DEPEND. FUTURA	GRAD. EXT.	POTENC. DESARR.
168	Calera de León	1082	93,36	59,9	59,9	0,0	Zafra	Zafra	70,4	163,8
169	Palma del Río	20855	109,70	0,0	0,0	0,0	Palma del Río	Palma del Río	52,8	162,5
170	Monesterio	4368	85,31	30,2	30,2	0,0	Zafra	Zafra	70,4	155,7
171	Loja	21341	106,53	0,0	0,0	0,0	Loja	Loja	48,8	155,3
172	Salar	2803	101,82	17,4	17,4	0,0	Loja	Loja	53,2	155,0
173	Algarinejo	3957	74,34	75,3	75,3	0,0	Loja	Loja	67,0	141,3
174	Puente-Genil	29093	105,90	0,0	0,0	0,0	Puente Genil	Puente Genil	32,1	138,0
175	Palenciana	1594	101,98	57,5	57,5	0,0	Lucena	Lucena	33,3	135,3
176	Zagra	1022	86,10	51,2	51,2	0,0	Loja	Loja	49,1	135,2
177	Iznájar	4843	91,88	77,1	77,1	0,0	Priego de Cordob	Priego de Cordob	31,1	123,0



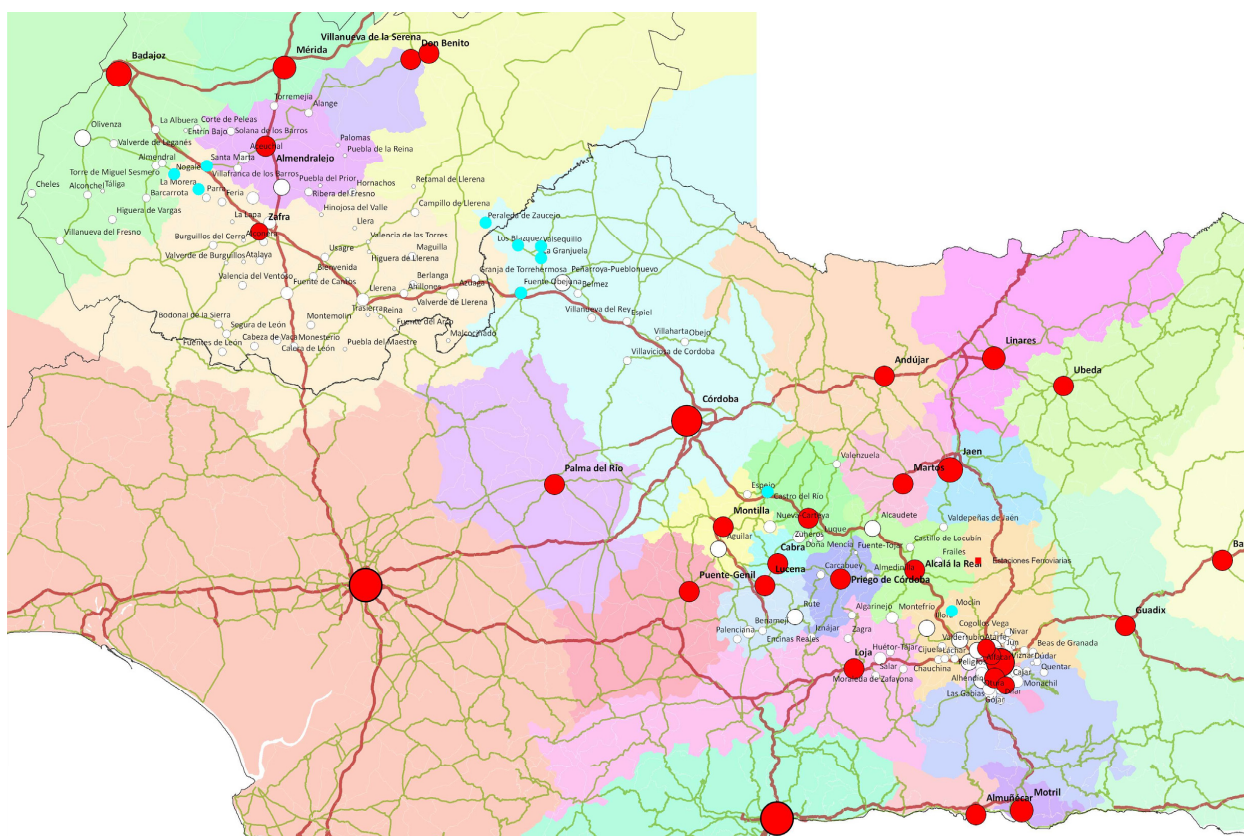


FIGURA 3.117. Áreas tributarias de los núcleos principales según tiempos de recorrido a través de la red viaria futura y núcleos con cambios de dependencia.

(página anterior)

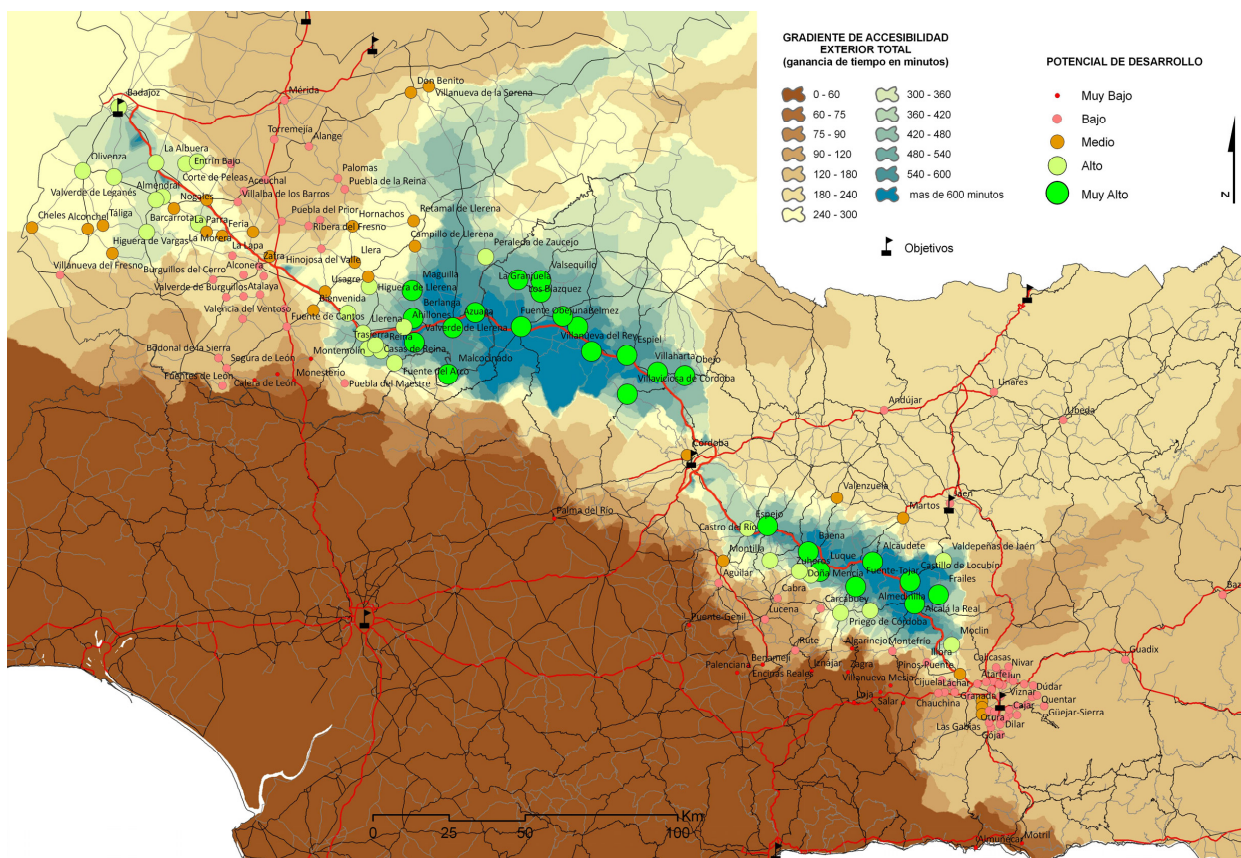
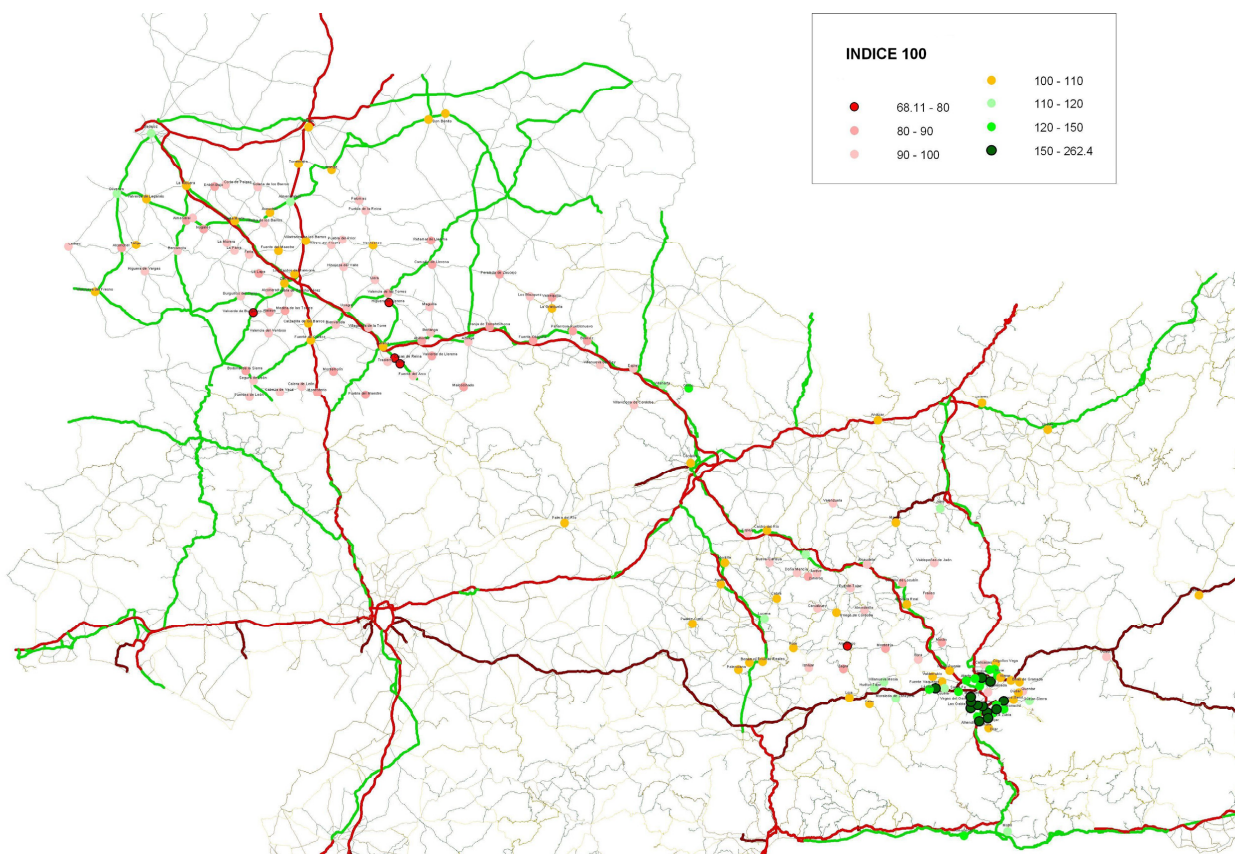
FIGURA 3.115. Áreas tributarias de los núcleos principales según tiempos de recorrido a través de la red viaria actual

FIGURA 3.116. Áreas tributarias de los núcleos principales según tiempos de recorrido a través de la red viaria futura.

(página siguiente)

FIGURA 3.118. Dinámicas poblacionales en el ámbito de estudio (Índice 100, 1996-2007).

FIGURA 3.119. Potencial de desarrollo inducido por la Autovía Badajoz-Granada



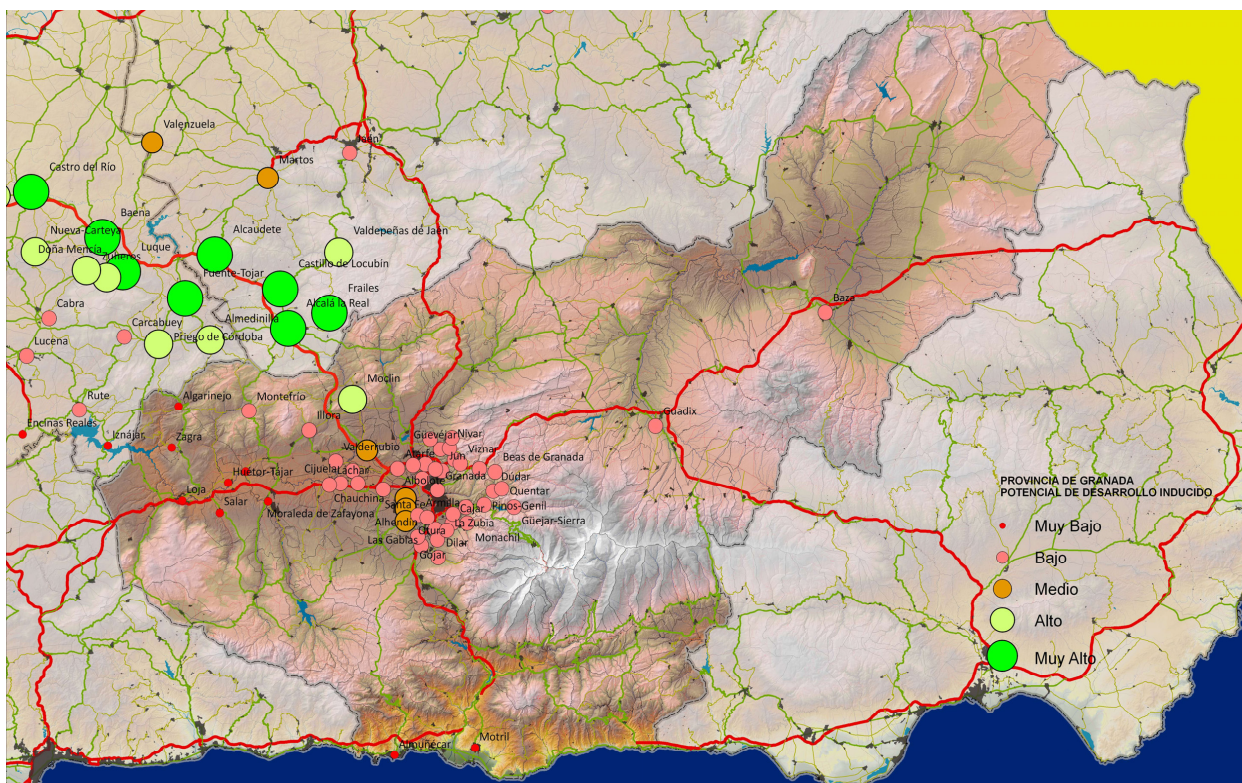
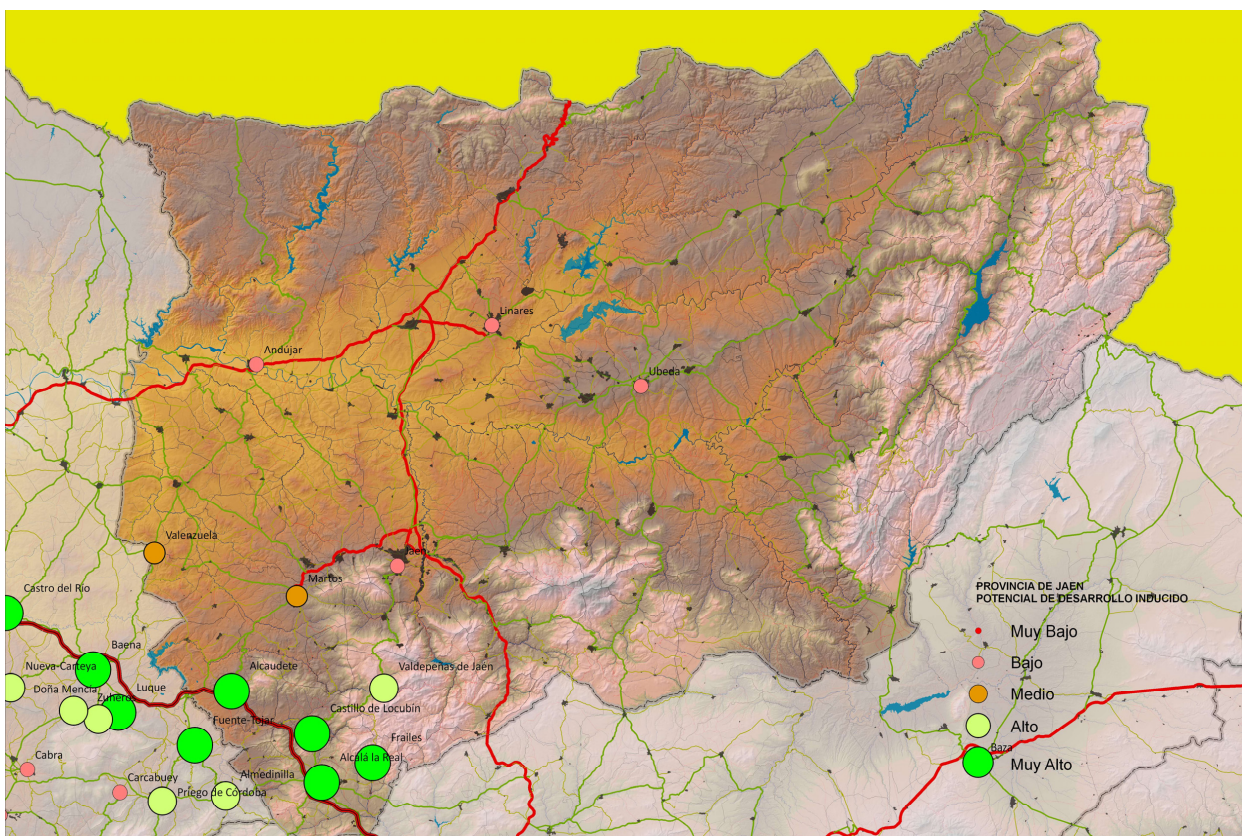
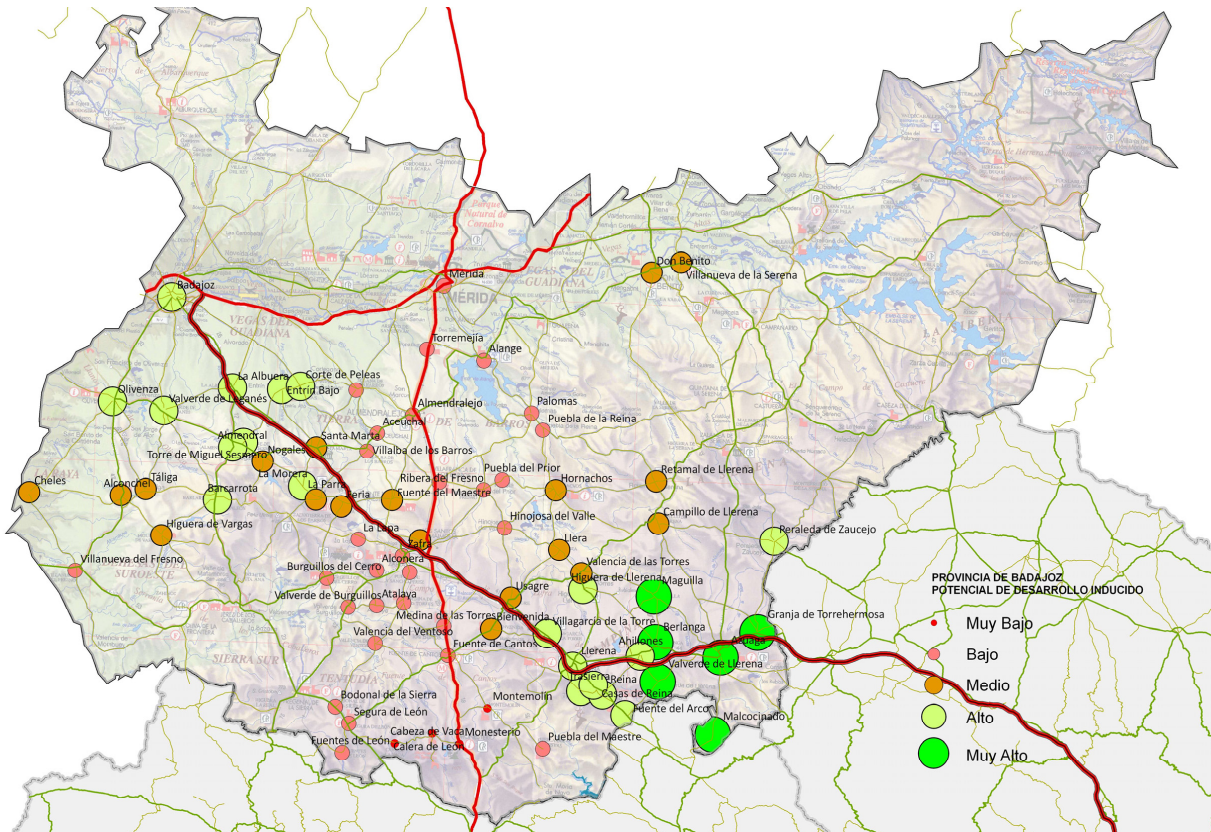
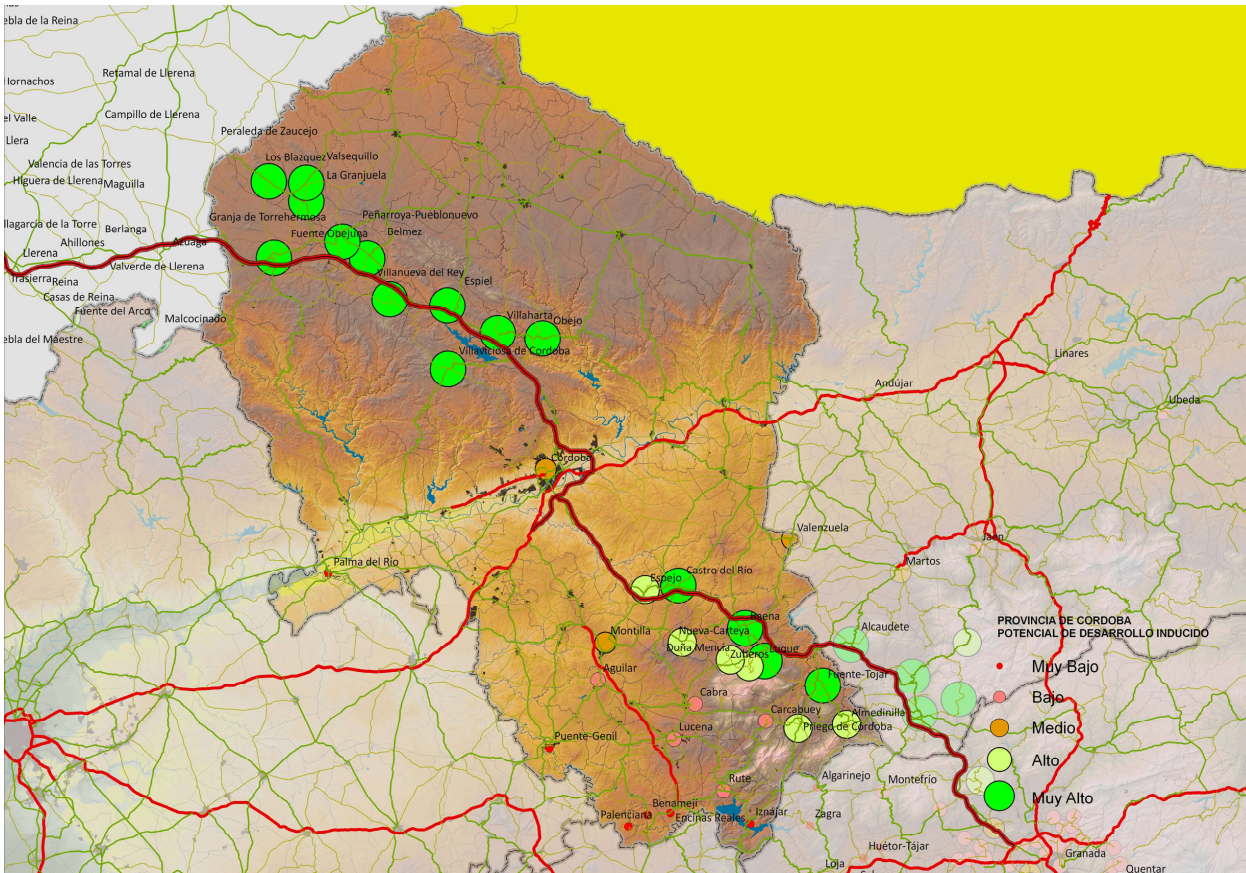


FIGURA 3.120. Potencial de desarrollo inducido por la Autovía Badajoz-Granada en la provincia de Granada

FIGURA 3.121. Potencial de desarrollo inducido por la Autovía Badajoz-Granada en la provincia de Jaén.





(página anterior)

FIGURA 3.122. Potencial de desarrollo inducido por la Autovía Badajoz-Granada en la provincia de Córdoba

FIGURA 3.123. Potencial de desarrollo inducido por la Autovía Badajoz-Granada en la provincia de Badajoz

CAPITULO 4

Localización óptima de infraestructuras. Cartografías de aptitud.....171

4.1. Introducción

4.2. Metodologías para la ubicación óptima de equipamientos. Capacidad de acogida del territorio.

4.2.1. Localización de instalaciones de tipo puntual

4.2.1.1. Modelos de localización óptima para instalaciones deseables.

4.2.1.2. Modelos de localización óptima para instalaciones no deseables.

4.2.2. Localización de rutas y otras infraestructuras lineales.

4.2.3. Asignación óptima de los usos del suelo

4.3. Desarrollo y aplicación de una nueva metodología para ubicación de vertederos de residuos urbanos con Sistemas de Información Geográfica.

4.3.1. Metodología

4.3.1.1. Variables de vertedero e Indicadores de Impacto

4.3.1.2. Índice de Probabilidad de Contaminación y Valor Ambiental

4.3.1.3. Índice de Riesgo Ambiental

4.3.1.4. Índice de Idoneidad para la Ubicación de Vertederos

4.3.2. Ejemplo de aplicación

4.3.2.1. Modelización de las variables del vertedero

4.3.2.2. Implementación del modelo

4.3.2.2.1. Cartografías del Índice de Riesgo de Contaminación.

4.3.2.2.2. Cartografías de los Índices de Probabilidad de Contaminación.

4.3.2.2.3. Cálculo de los Valores Ambientales y Cartografías de los Índices de Riesgo Ambiental.

4.3.2.2.4. Cartografía del Índice de Idoneidad de Ubicación de Vertederos.

4.4. Conclusiones

4 LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE INFRAESTRUCTURAS. CARTOGRAFÍAS DE APTITUD.

4.1. Introducción.

En este capítulo se realiza una aproximación a la representación de la aptitud del territorio, para la localización correcta, adecuada, u “óptima”, de cualquier tipo de actividad, instalación o infraestructura. Comenzando por un recorrido a través de las diferentes metodologías para la ubicación óptima de equipamientos y culminando con un caso práctico de desarrollo y aplicación de una nueva metodología para ubicación de vertederos de residuos urbanos mediante Sistemas de Información Geográfica.

El problema de la localización óptima:

La organización espacial del territorio ha sido estudiada desde antaño y desde multitud de puntos de vista. Los problemas de localización, presentes en la existencia humana desde sus orígenes, entraron en la ciencia como problemas matemáticos: durante años, científicos como Fermat, Torricelli, Silvester o Steiner, propusieron ingeniosos métodos algebraicos, geométricos o mecánicos para resolver problemas como los siguientes:

- Determinar el punto del plano tal que la suma de las distancias a tres puntos fijos sea mínima,
- Determinar el centro del círculo de mínimo radio que encierra a un conjunto de puntos dado,
- Determinar el punto de un polígono fijo tal que sea máximo el radio del círculo con éste como centro y que no contenga a su interior a ninguno de los puntos de un cierto conjunto,
- Determinar los centros los círculos contenidos en un cuadrado, que no tengan más solapamiento entre ellos que en sus bordes, y que el radio de los discos sea máximo,
- Determinar la forma de interconectar N puntos, de modo que se minimice la suma de las longitudes de los segmentos de conexión.

Pero es en el siglo pasado cuando estas cuestiones dejan de ser meros entretenimientos matemáticos. Por ejem-

plo, el primero de los problemas anteriores es el famoso problema de Fermat-Weber, que busca la localización de un centro de distribución para minimizar el coste total de transporte (asumiéndolo proporcional a la distancia recorrida) a los centros de demanda o destino; el segundo problema, con el de encontrar la localización de un centro de emergencia, de modo que el usuario más alejado esté lo más cerca posible; el tercero, con el de encontrar la ubicación a un servicio nocivo en una región dada, de modo que el centro de población más próximo esté lo más lejos posible; el cuarto, con el de ubicar establecimientos (farmacias, gasolineras, etc.) que, para evitar excesiva competencia entre ellos, exista entre ellos la máxima separación posible. El último problema, el del árbol de Steiner, ha sido usado en disciplinas tan dispares como las Telecomunicaciones (diseño de conexiones de redes de ordenadores) o la Bioinformática.

Importantísimo es también el tratamiento dado desde la Geografía (clásica, regional, neopositivista o comportamental) siendo la Geografía regional francesa y la Geografía cuantitativa las que se han dedicado a tratar y desarrollar conceptos, métodos e instrumentos para describir y explicar la localización de las actividades humanas sobre el territorio (Bosque et al. 2004).

Así, ya en el tratado de geografía humana de M. Derruau (1961), se incluye un amplio capítulo dedicado al estudio de la localización de la industria, insistiendo en el papel esencial de los costes del transporte pero sin emplear aún modelos precisos o matemáticos. Economistas y científicos regionales fueron aportando posteriormente teorías y modelos operativos, David Smith (1971) recoge en su libro un balance de los trabajos de A. Weber, T. Palander, E. Hoover, A. Losh o W. Isard, pero fueron los geógrafos cuantitativos los que, desde comienzos de los años 60, comenzaron a desarrollar y a aplicar estas teorías y modelos para la localización, entre ellos destacan P. Haggett, W. Bunge o R.L. Morrill y algunos otros, que recogieron los trabajos pioneros de Christaller en los años 30. (De Verteuil, 2001).

Los ejemplos anteriores, o los descritos, por ejemplo,

en los monográficos de Drezner (1995) o de Drezner y Hamacher (2002), no son sino meras ilustraciones del hecho de que la localización ya no es solo parte de las matemáticas o de la geografía, y es por ello que, cada vez más las tecnologías de la información geográfica, como los SIG, se están empleando en esta línea de trabajo, accesible para una gran variedad de técnicos concienciados con la buena ordenación del territorio, tales como ingenieros, arquitectos o ambientólogos.

Los SIG se encuentran relativamente bien preparados, dadas sus posibilidades de manejar datos geográficos de diversa procedencia y las posibilidades de integración, entre las funciones usuales de estos instrumentos, de técnicas como la Evaluación Multicriterio (Gómez y Barredo, 2005) o de los modelos matemáticos de optimización (Bosque y Moreno, 2004).

4.2. Metodologías para la ubicación óptima de equipamientos. Capacidad de acogida del territorio.

La variedad de problemas donde esta idea general se puede concretar es muy variada, siendo una de las posibles clasificaciones la que se basa en una cuestión de cierta relevancia en los datos que usan los SIG: la geometría de los elementos a localizar. Así, el tratamiento, las técnicas a aplicar y las aplicaciones serán diferentes si los elementos son puntuales, lineales o poligonales.

Atendiendo a esta cuestión se pueden diferenciar tres tipos de cuestiones:

- La localización óptima de instalaciones que se pueden asimilar, en su representación espacial a puntos, en los que el tamaño físico (longitud, anchura, etc.) no tiene especial relevancia, solo es de interés su posición espacial y sus características temáticas: importancia de la oferta que pueden satisfacer, etc.
- La determinación del trazado óptimo de las infraestructuras lineales, como carreteras, líneas férreas, etc., en las que los hechos a disponer en el territorio tienen una representación geométrica en forma de líneas (donde lo que único que importa es la longitud)

- En tercer lugar, los problemas de la asignación óptima de usos del suelo, en donde se trata de localizar las actividades humanas representadas geométricamente mediante objetos poligonales.

4.2.1. Localización de instalaciones de tipo puntual

En este caso estamos tratando de la localización “óptima” de instalaciones con reducida extensión superficial: hospitales, escuelas, comercios, vertederos, etc. En este caso, la idea principal reside en conseguir posiciones de los equipamientos e instalaciones que maximicen la eficacia y la justicia espacial derivadas de su empleo por la población y reduzcan los posibles impactos ambientales (Bosque y Moreno, 2004).

Estos conceptos de eficacia o eficiencia espacial (dada una posición concreta de la demanda, se busca el coste mínimo en la construcción y uso cotidiano de la instalación) y justicia o equidad espacial (las instalaciones deben situarse igualmente repartidas en cuanto al acceso de la población) se asimilan a la idea de accesibilidad espacial o proximidad (tratada ampliamente en el capítulo anterior) que se presta excepcionalmente bien al objetivo de caracterizar y valorar escenarios geográficos, por la autenticidad de su significado y por su versatilidad (Bosque et al. 2007)

La justicia ambiental, como concepto más reciente, se refiere a la necesidad de que las instalaciones que producen daños y peligros potenciales en su entorno no se encuentren situados de manera concentrada en los lugares donde residen grupos étnicos y sociales empobrecidos y con menos posibilidades de presión social y económica (Bahaladur et al. 1998 y Bosque et al. 2002)

El significado de “óptimo” será preciso especificarlo en cada problema, pero de manera amplia se debe entender como la solución de máxima eficiencia espacial, mínimo coste ambiental y máximo grado de equidad espacial.

Atendiendo al tipo de externalidad predominante (positiva o negativa) que produce la instalación a situar, podemos clasificarlas, mediante una simplificación que progresivamente está siendo superada por modelos más realistas y complejos, en deseables o no deseables. Así,

Los modelos de localización, que dan soluciones efectivas al problema de determinar los mejores esquemas de localización de los equipamientos, se distinguen también entre los que son idóneos para ubicar instalaciones deseables o saludables y los que tratan la localización de instalaciones molestas. Un amplio y detallado estudio de estos modelos se puede encontrar en Bosque et al. (2004).

4.2.1.1. Modelos de localización óptima para instalaciones deseables:

Los modelos más reconocidos para ubicar las instalaciones que suponen un beneficio para la población (desde equipamientos sanitarios, educativos, deportivos, culturales, sociales o comerciales, hasta estaciones de bomberos, policía o ambulancias) abordan y resuelven las dos vertientes del problema: determinar la ubicación óptima del equipamiento y asignar la demanda a los puntos de oferta, de lo que se deriva la definición de área de servicio o de mercado (concepto también tratado en el capítulo anterior). Por este motivo son denominados también modelos de localización- asignación. Los modelos clásicos atienden generalmente a 3 objetivos, el de eficiencia, buscando la mayor accesibilidad u orientados hacia la maximización del beneficio, el de equidad, donde se busca maximizar la igualdad en las oportunidades de acceso de la población y el de cobertura espacial, más interesado en disponer de una solución satisfactoria en un radio de distancia o tiempo de desplazamiento, que en deseo de optimizar.

Se resumen a continuación los modelos de uso más generalizado:

Minisum /p-Mediano:

Establecido un número de centros de servicio a instalar y una demanda espacialmente fija, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que minimizaría el coste de desplazamiento total de los usuarios, asignándolos al centro más próximo.

UFLP (uncapacitated facility location problem) o SPLP (simple plant location problem):

Establecido un número de centros de producción a instalar y una demanda espacialmente fija, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que minimizaría la función de costes (incluyendo los de pro-

ducción en cada lugar – fijos y variables – y los de transporte) para servir a todos los usuarios.

LA4:

Establecido un número de centros de servicio a instalar y una serie de asentamientos, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que maximiza el potencial de accesibilidad de los centros de servicio sobre el punto de demanda más próximo.

Minimax:

Establecido un número limitado de equipamientos a instalar, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que minimizaría la distancia o desplazamiento máximo ocasionado, asignando siempre la demanda al centro más próximo.

Conjunto de cobertura:

Establecido un número de sitios candidatos a acoger puntos de servicio, averiguar el conjunto de ellos que minimiza la cifra de centros de servicio, garantizando que toda la demanda esté dentro de un radio de distancia o coste de desplazamiento predefinido, y asignando siempre la demanda al centro más próximo.

Cobertura máxima (Cobemax):

Establecido un número de centros de servicio a instalar, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que garantiza que el máximo número de usuarios está dentro de un radio de distancia o coste de desplazamiento predefinido, asignando siempre la demanda al centro más próximo.

Cobertura máxima con restricción de alcance espacial (Coberes):

Establecido un número de centros de servicio a instalar, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que garantiza que el máximo número de usuarios está dentro de un radio de distancia o coste de desplazamiento predefinido, y que ningún usuario queda a más distancia de otro valor mayor que el anterior, asignando siempre la demanda al centro más próximo.

Minisum / p-Mediano con cobertura obligatoria:

Establecido un número de centros de servicio a instalar y una demanda espacialmente fija, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que minimizaría el coste de desplazamiento total de los usuarios, asign-

nándolos al centro más próximo.

Maxcap-Captura máxima con demanda inelástica:

Establecida la existencia de un número de equipamientos en una localización conocida y fija, averiguar de entre los sitios posibles qué conjunto de ellos lograría captar la máxima demanda para los nuevos establecimientos, en competencia con los ya existentes, y asignando los usuarios al equipamiento más cercano.

Maximización de demanda elástica con asignación determinista:

Establecido un número de centros a localizar, identificar el conjunto de lugares que en conjunto lograrían atraer el máximo de demanda, asumiendo que ésta es elástica respecto a la distancia y asignando siempre dicha demanda solo al centro más próximo.

P-elección (P-Choice) maximización de demanda elástica con asignación determinista:

Establecida la existencia de un número de equipamientos en una localización fija y conocida, averiguar de entre los sitios posibles qué conjunto de ellos lograría captar la máxima demanda, para los nuevos establecimientos, en competencia con los ya existentes, y asignando los usuarios de manera probabilística.

4.2.1.2. Modelos de localización óptima para instalaciones no deseables:

Se definen como instalaciones no deseables aquellas que, aunque indispensables, representan riesgos o amenazas para el medio ambiente o molestias para la población. En este caso se encuentran, por ejemplo, los lugares donde se procesan los residuos producidos por la sociedad (vertederos de residuos sólidos urbanos, centros de tratamiento de residuos industriales...), los centros para el tratamiento de personas con problemas (cárceles, centros de atención la drogodependencia), almacenes de residuos nucleares o las mismas centrales nucleares.

En la bibliografía se ha reconocido desde hace tiempo el problema de localización de estas instalaciones que generan externalidades negativas pero es recientemente cuando se les ha identificado con acrónimos o expresiones como NIMBY (not in my backyard), NIABY (not in anybody backyard), LULU (locally unwanted land use) o

BANANA (build absolutely nothing at all near anybody).

La resolución efectiva del problema se ha sustentado igualmente en las técnicas de optimización matemática y los correspondientes programas informáticos. La cifra de modelos elaborados a tal fin por los investigadores está creciendo de forma notoria en las últimas décadas. (Bosque et al, 2007). Ya en Moon et al. (1984) o en Erkut et al (1989) y más recientemente en Bosque et al (2004), se pueden encontrar revisiones detalladas sobre la literatura existente.

Estos modelos parten igualmente de las dos magnitudes antes citadas, eficiencia y equidad, pero en este caso con un matriz diferente. Pese al beneficio global se produce un perjuicio local, una molestia o peligro en el entorno inmediato de cada instalación. Ahora la población desea tener este tipo de instalación lo más lejos que sea posible. La medida de la eficiencia es más complicada, no puede ser simplemente la minimización de las distancias, es imprescindible considerar simultáneamente, la minimización de las molestias que ocasiona la posición de las instalaciones, lo que puede llevar a tener que maximizar las distancia con la población afectada. (Bosque y Franco, 1995; Bosque et al, 1999).

Para las instalaciones no deseables los modelos más utilizados son:

MaxiSum o anti-mediano:

Establecido un número limitado de instalaciones a situar, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que maximizaría la distancia, ponderada por la población, entre las instalaciones y los lugares poblados, asignando cada lugar a la instalación más próxima. Una variante de este modelo es el p-maxisum-sum o p-defense, que maximiza la dispersión promedio entre instalaciones.

MaxiMin:

Establecido un número limitado de instalaciones a situar, averiguar, de entre los emplazamientos posibles, el conjunto que maximizaría la distancia mínima entre cualquier centro de población y la instalación más próxima. Una variante a este modelo es el p-disperse

Complementario - Anticobertura:

Establecido un número de instalaciones a implantar y de lugares con posibilidad de acogerlas, identificar el con-

junto de ellos que minimizaría la población dentro de un radio de distancia dado de una o más instalaciones.

Minimpact:

Establecido un número de instalaciones a implantar y de lugares con posibilidad de acogerlas, identificar el conjunto de ellos que minimizaría el impacto global generado por todas las instalaciones sobre todos los asentamientos, expresado como el producto del nivel de inmisión por la población afectable en cada lugar.

MinMaxSum:

Establecido un número de instalaciones a implantar y de lugares con posibilidad de acogerlas, identificar el conjunto de ellos que minimizaría los costes de transporte desde los centros de población hasta dichas instalaciones y a la vez maximizaría la distancia entre ambos.

Una interesante línea de investigación metodológica, más tardía, se ha decantado por buscar soluciones a problemas de localización en los que se asume que la cuestión más acuciante estriba en minimizar los efectos negativos o perjuicios que generan. Podría decirse que el tratamiento de estos problemas surge de la confluencia entre la teoría de la localización y la actual preocupación ambiental, confiriéndole un potencial de aplicación muy notable (Bosque et al. 2007).

La aplicación presentada más adelante se enmarca en esta dirección. Se trata de una metodología de diagnóstico ambiental, que permite llevar a cabo un análisis de puntos de vertido en funcionamiento con la finalidad de detectar su impacto ambiental, debido a su ubicación, así como a su nivel de explotación.

4.2.2. Localización de rutas y otras infraestructuras lineales.

Los inventarios sobre redes de carreteras y ferrocarriles basados en tecnología SIG, donde se almacenan datos relativos a sus características geométricas, estado de conservación, intensidad de tráfico, señalización o puntos de concentración de accidentes, son cada vez más frecuentes, pero es en el diseño de rutas y en la definición de corredores o alternativas de trazado de nuevas infraestructuras y en su gestión donde los SIG aportan, entre otras, su capacidad de cálculo de caminos mínimos a través de superficies de fricción, y de minimiza-

ción de costes constructivos, de expropiación o costes ambientales.

El trazado de corredores más aptos, ambiental, social y estéticamente, o lo que viene a ser lo mismo, la determinación de la capacidad de acogida del territorio frente a una infraestructura lineal, puede hacerse fácilmente mediante técnicas de reclasificación y superposición de variables, siguiendo la base metodológica que ya a final de los 60, y de forma teórica, propusiera Ian McHarg en su obra "Design with Nature".

Se pueden formular, por tanto, dos tipos de problemas:

- Localización de caminos/rutas óptimas sobre redes lineales ya existentes.

Un ejemplo sería el clásico problema del viajante, consiste en establecer por donde debe viajar un repartidor de productos de manera que el coste del viaje (o el tiempo de recorrido) sea mínimo. Existen diversos algoritmos matemáticos que resuelven el problema, usualmente disponibles en los programas de análisis de redes integrados en los Sistemas de Información Geográfica.

- Determinación del nuevo trazado de redes o de caminos óptimos.

El diseño de un nuevo trazado, tiene dos variantes: una, la más sencilla es escoger entre varios trazados diferentes la nueva ruta, evaluando cual es el más adecuado. Cada ruta se evalúa por separado y se elige la que sea más corta o barata de recorrer.

La segunda variante, y quizás la más interesante, es determinarlo a partir de la consideración de las características intrínsecas de cada punto para ser utilizado en el trazado de la nueva infraestructura. En este último caso se han formulado algunos procedimientos prácticos, cuyos ejemplos de aplicación se pueden encontrar en: Gómez et al. (1995) y Gómez y Bosque (2001).

4.2.3. Asignación óptima de los usos del suelo

Se trata de una tarea muy habitual en los planes de ordenación urbana o territorial. La cuestión se refiere a donde es más adecuada la ubicación del uso residencial, del uso industrial, del uso agrícola, etc., teniendo en cuenta las demandas existentes de cada tipo de usos y las características del territorio en cada punto.

Existen numerosas modalidades para resolver el tema,

una de la más conocida es la de establecer la capacidad de acogida de cada punto del terreno para recibir una actividad.

Entendida la capacidad de acogida como “el grado de idoneidad que presenta el territorio para una actividad, teniendo en cuenta a la vez, la medida en que el medio cubre sus requisitos locacionales y los efectos de dicha actividad sobre el medio” (Gómez, 1992), es clara su relación con la aptitud del territorio y con la elección de la localización óptima de una actividad.

La capacidad de acogida depende, a su vez, de la aptitud intrínseca de cada punto del territorio para soportar un tipo concreto de uso y del impacto ambiental que la localización allí de ese uso genera en el entorno.

Determinada la capacidad de acogida de cada uno de los usos o actividades previstas se puede elegir aquel que, comparativamente, tenga máxima la capacidad de acogida. En Gómez et al. (2005) se puede encontrar una muy amplia discusión de toda la problemática del tema.

En muchas ocasiones el modelo de localización no debe estar orientado a la optimización de un único objetivo (como, por ejemplo, la minimización del coste de transporte) sino varios objetivos, en ocasiones contrapuestos. Así, junto a la minimización del coste transporte, si el centro a ubicar tiene efectos no deseados (nocivos) para algunos individuos o regiones a proteger, debería incluirse otro objetivo orientado a la minimización del impacto ambiental. Nos encontramos en este caso con modelos semi-repulsivos, descritos en Blanquero et al. (2002), Carrizosa et al. (2002), Carrizosa et al. (1999), Krarup et al. (2002) y Ohsawa et al. (2003).

En la localización de servicios públicos, junto al criterio de eficiencia (modelado generalmente a través de la minimización del coste total de transporte), puede ser necesario considerar aspectos de equidad: el servicio debería ser, idealmente, de la misma calidad para todos los usuarios. Esto puede modelarse imponiendo como segundo objetivo la minimización de la mayor de las distancias, o bien minimizando una medida de dispersión de las distancias para que las distancias que separan al servicio de los usuarios sean similares. La minimización del rango, de la varianza de las distancias, o de medidas como el índice de Gini ha sido contemplada, entre otros,

en Carrizosa (1999), Erkut (1993), López de los Mozos et al. (2001) o Marsh et al. (1994).

Admitido el carácter multicriterio del problema, e identificados los distintos objetivos, nos encontramos frente al dilema de cómo proceder a continuación.

El enfoque tradicional ha sido el de la escalarización aditiva, combinando todos los criterios en uno solo, que represente la suma ponderada de los anteriores. Esta aproximación tiene dos inconvenientes graves: en primer lugar, es necesario determinar los pesos de importancia asociados a los distintos criterios, lo cual puede no ser un ejercicio trivial; incluso si nos consideramos capaces de determinar la importancia relativa de cada criterio frente al resto, el agregar aditivamente los criterios puede provocar que ciertas soluciones interesantes no puedan ser detectadas.

Lo más razonable es perseguir la descripción del conjunto de soluciones eficientes, o, en su defecto, una aproximación al mismo, como en Blanquero et al. (2002). En Fernández et al. (2004), se puede encontrar una interesante introducción a la práctica del Análisis Multicriterio.

4.3. Aplicación de una nueva metodología para ubicación de vertederos de residuos urbanos con Sistemas de Información Geográfica.

La utilización de los vertederos como solución para la eliminación de residuos ha sido utilizada por diferentes comunidades (Komilis et al., 1999) dando lugar a importantes problemas medioambientales como: contaminación de aguas superficiales y subterráneas (Abu-Rukah et al., 2001), problemas de estabilidad en la masa de residuos (Edgers et al., 1992; El-Fadel et al., 1997), fuego y explosiones (Raybould, 1987), afección a la flora y fauna (Gilman et al., 1985), malos olores (Sarkar et al., 2003), contaminación del aire (McBean et al., 1995) y efecto invernadero (El-Fadel et al., 1997).

La Comunidad Europea estableció en 1975 un instrumento normativo para abordar la gestión de los residuos, la Directiva del Consejo 442/75, en la que se consideraba que la infraestructura de gestión más adecuada para los residuos era el vertedero controlado. Las tendencias europeas han ido evolucionando, plasmándose en recomendaciones y estrategias para la gestión de los residuos (Zamorano et al., 2007).

En la actualidad la estrategia comunitaria en materia de gestión de residuos establece una jerarquización de las opciones basada en los principios recogidos en las últimas disposiciones sobre residuos, conocida como el principio de las tres Rs: Reducción, Reutilización y Reciclaje (Figura 4.1). La transposición de la Directiva 91/156/CEE a nuestra normativa da lugar a la denominada Ley de Residuos 10/98, que establece la gestión integral de los residuos, coordinando todas las políticas afectadas y poniendo de relieve los citados principios básicos de gestión promulgados por la política europea.

El marco legal actual, Directiva 31/1999 y RD 1481/2001, relativo al vertido de residuos, reconoce el vertedero controlado como una adecuada forma para el depósito de residuos, siempre y cuando se lleve a cabo un tratamiento previo, con la finalidad de fomentar los principios de reducción, reutilización y reciclaje. El vertido o eliminación de residuos es la última actuación en el

orden jerárquico establecido en el marco europeo para la gestión de los residuos; aparece de esta forma el término vertedero de rechazo.

En la actualidad la gestión integral de vertederos se puede dividir en tres grandes fases:

(i) Planificación, diseño y trazado, (ii) Explotación y (iii) Cierre, sellado, reinserción y mantenimiento post clausura. (Zamorano et al., 2007). Dentro de la fase de planificación, diseño y trazado, la selección de áreas idóneas es fundamental para reducir los problemas planteados por la instalación durante su explotación. La ubicación de un vertedero es un complicado proceso en el que hay que considerar la combinación de parámetros sociales, medioambientales y técnicos, que a su vez supongan la minimización de costes, desde el punto de vista de su construcción y explotación (Vaillancourt, K. y Waaub, 2002 ; McBean et al., 1995).

La bibliografía relativa a residuos recoge diferentes técnicas que facilitan la toma de decisiones en materia de ubicación de vertederos, por ejemplo Sistemas de Información Geográficos (SIG) (Siddiqui, 1996; Kontos et al., 2003), sistema espacial basado en vectores de datos (Lin y Kado, 1998), aplicación de técnicas multicriterio (Kao, 1996) y su combinación con los SIG (Montos et al., 2005), así como la utilización de tecnologías de inteligencia artificial como sistemas expertos (Gupta et al., 2003; Siquiera et al., 2005).

Un grupo de investigadores de la Universidad de Granada ha desarrollado una metodología de diagnóstico ambiental, denominada EVIAVE, que permite llevar a cabo un análisis de puntos de vertido en funcionamiento con la finalidad de detectar su impacto ambiental, debido a su ubicación, así como a su nivel de explotación (Zamorano et al., 2005). Ha sido aplicada hasta el momento en vertederos españoles (Calvo et al., 2005), de Venezuela y Chile (Calvo et al., 2006).

A continuación se describe una nueva metodología, basada en la EVIAVE, como herramienta para la toma de decisiones en materia de ubicación de nuevos vertederos de residuos no peligrosos y su combinación con Sistemas de Información Geográfica, de acuerdo con el marco legal actual en el marco del vertido de residuos.

4.3.1. Metodología

La metodología está basada en el uso de índices medioambientales diseñados para obtener una cuantificación de la interacción entre el vertedero y los componentes medioambientales que pueden ser potencialmente afectados por el vertido: aguas superficiales, aguas subterráneas, atmósfera, suelo y salud humana. El proceso se desarrolla en cuatro fases, que se recogen en la Figura 4.2. El ámbito de aplicación de la metodología es vertederos para residuos no peligrosos, según la definición de la Directiva 31/1999 y el RD 1481/2001.

4.3.1.1. Fase I: Variables de vertedero e Indicadores de Impacto

Variables de vertedero

Se define como variable de vertedero a aquel aspecto o característica del mismo que, por su sensibilidad en los procesos bioquímicos y físicos del mismo, influye directa o indirectamente sobre la afección ambiental a los diferentes parámetros o elementos del medio considerados (Zamorano et al., 2007). Estas variables se recogen en la Tabla 5.1 y se establecieron teniendo en cuenta relevantes estudios teóricos y prácticos relacionados con la ubicación del punto de vertido y su problemática ambiental así como las directrices establecidas por la normativa europea y española.

La evaluación de cada variable (j) se obtiene a partir del Índice de Riesgo de Contaminación (IRC_j), que viene dado por la expresión (i) recogida en la Figura 4.2, en la cual C_j es la clasificación de la variable que dependerá del estado o condición de ésta en el punto de vertido; P_j es la importancia o ponderación que dependerá del concepto de elemento estructural del punto de vertido: existencia de materia orgánica, humedad y densidad. Estos tres conceptos participan en los principales procesos bioquímicos y físicos que se producen en el punto de vertido, dando lugar a la producción de gases y lixiviados (Szanto, 2000; Tchobanoglous et al., 1994; Costa, 1982), por lo que afectan a todos los parámetros y son por tanto los que van a proporcionar mayor ponderación de las diferentes variables de vertedero. Todas las variables utilizadas para la medición de la probabilidad de afección que estén directamente relacionadas con estos elementos estructurales, o bien afecten directamente al un elemento del medio, tendrán una ponderación máxi-

ma para dicho componente ambiental. En otro caso la ponderación de la variable tendrá valor unitario.

Por ejemplo la estabilidad mecánica de un vertedero está determinada por un factor de seguridad que representa la relación entre fuerzas que tienden al movimiento gravitacional de la masa de relleno y las fuerzas resistentes propias del material que conforma el relleno. Entre las fuerzas que inducen el movimiento gravitatorio de la masa del relleno se encuentran las provocadas por las vibraciones sísmicas (Calvo, 2003). Atendiendo a los efectos que se producen sobre las láminas de sellado, sobre los sistemas de recogida de lixiviados, el riesgo potencial de deslizamiento de la masa de vertido (EPA, 2000), los sistemas de captación de aguas superficiales, captación de gases, la cobertura, etc., se ha considerado necesaria la inclusión de la variable riesgo sísmico en la probabilidad de afección a todos los elementos del medio. Esta variable afecta directamente a todos los elementos del medio luego toma ponderación 2. Para su clasificación (Tabla 5.2) se han usado las correspondencias que entre las escalas de Mercalli modificada y M.S.K. (Decreto 3209/1974) y el Real Decreto 997/2002 la aceleración sísmica básica para periodos de retorno de 500 años. Semejante justificación y cuantificación se lleva a cabo en el resto de las variables.

Indicadores de Impacto

En el proceso de evaluación de impacto ambiental los Indicadores de Impacto se definen con la finalidad de medir el impacto ambiental en cada elemento del medio (Antunes et al., 2001). En esta metodología se definen como aspectos medioambientales que pueden verse afectados por el proyecto de un vertedero y se utilizan para la posterior cuantificación de los Valores Ambientales (Zamorano et al., 2005). Se han seleccionado teniendo en cuenta la experiencia de profesionales e investigadores en materia de evaluación de impacto. En la Tabla 1 se recogen los Indicadores de Impacto seleccionados para cada elemento del medio. El elemento del medio salud, siempre toma valor máximo. La Tabla 5.3 muestra un ejemplo de cuantificación del indicador de impacto tipo de masa de aguas para el elemento del medio agua superficial que se ha clasificado teniendo en cuenta la relación existente entre la emisión de contaminantes, por parte del punto de vertido, y la gravedad de afección al recurso hídrico superficial, dependiendo del tipo de curso superficial que se encuentre en las cer-

cañas, así como los criterios establecidos en el anexo IV sobre zonas de protección, de la Directiva 2000/60/CE. Similar justificación y cuantificación se ha llevado a cabo en el resto de los indicadores.

4.3.1.2. Fase II: Índice de Probabilidad de Contaminación y Valor Ambiental

Índice de Probabilidad de Contaminación

El Índice de Probabilidad de Contaminación (Pbci) de los elementos del medio dependerá de las características de desplazamiento que poseen las emisiones del punto de vertido al entrar en contacto con el entorno. Para cuantificar la probabilidad de contaminación de los diferentes elementos se parte de las variables de vertedero definidas anteriormente, que participan en el riesgo de contaminación de cada uno de los elementos del medio y se aplica la expresión (ii) recogida en la Figura 4.2; en esta expresión n es el número de variables que afectan a cada elemento del medio, j hace referencia a cada variable analizada y IRC_{min} e IRC_{max} son los valores mínimos y máximos obtenidos para el Índice de Riesgo de Contaminación para cada variable. El indicador puede tomar valores entre 0 y 1, lo que permite clasificarlo según se indica en la Tabla 5.4.

Valores Ambientales

El Valor Ambiental (Vai) pretende identificar y cuantificar, desde la relación existente entre las características del elemento (ambientales y/o socio políticas) y las emisiones del vertedero, la consideración ambiental de cada uno de estos elementos en el entorno del vertido; por tanto para determinar el valor ambiental que adquieren los elementos del medio se consideran únicamente las características que puedan verse afectadas por la presencia del vertedero en el entorno inmediato. La valoración de un elemento del medio únicamente tiene sentido en el complejo vector que relaciona la dinámica del punto de vertido y su entorno. Se calcula como media aritmética de los Indicadores de Impacto para cada elemento del medio, tal y como se observa en las expresiones (iii-vi) de la Figura 4.2 y su rango oscila entre 1 y 5, lo que permite clasificarlo según se indica en la Tabla 4.5. Si un elemento del medio obtiene valores clasificados como altos o muy altos, esto indica que el punto de vertido se localiza en una zona con gran sensibilidad ambiental para el citado elemento del medio (Zamorano et al., 2005).

4.3.1.3. Fase III: Índice de Riesgo Ambiental

El Índice de Riesgo de Afección Ambiental (I.R.Ai) pretende conocer cual es el potencial de la afección ambiental que se produce para cada uno de los elementos del medio, considerando el valor ambiental del mismo. Se calcula aplicando la expresión (vii) recogida en la Figura 4.1. Obtiene valores comprendidos entre 0 y 5, que se clasifica según se recoge en la Tabla 4.5.

4.3.1.4. Fase IV: Índice de Idoneidad para la Ubicación de Vertederos

Finalmente la idoneidad de ubicación del punto de vertido, relacionada a los cinco elementos del medio considerados, se cuantifica mediante un índice denominado Índice de Idoneidad para Ubicación de Vertederos (IUV), determinado según la expresión (viii) recogida en la Figura 4.2. Alcanza valores comprendidos entre 0 y 25 que permiten clasificarlo según se indica en la Tabla 4.6.

4.3.2. Ejemplo de aplicación

El área elegida tiene una extensión de 300 km². y se sitúa al sur de la aglomeración urbana de Granada (España) en el borde occidental de Sierra Nevada (Figura 4.3). En cuanto a tratamiento, vertido y eliminación de residuos existe una Planta de Tratamiento de Residuos Urbanos, con vertedero de rechazo, en el término municipal de Alhendín, que concentra los residuos de los 30 municipios de la aglomeración, más otros 36 externos a la misma con un total de 677.505 habitantes que generan 266.513 Tm de residuos al año.

4.3.2.1. Modelización de las variables del vertedero

En el mundo de los Sistemas de Información Geográfica existen dos aproximaciones básicas a la cuestión de cómo modelizar el espacio, según se atiende a las propiedades o a la localización (Bosque, 1997) de las que resultan dos modelos de datos: vectorial y raster. Ambos modelos presentan una serie de ventajas y desventajas en función de la utilidad que se le quiera dar al SIG (Bosque et al., 1999; Barredo y Gómez, 2005), pero es la rapidez y eficiencia en las operaciones de superposición de mapas la característica determinante para la elección final del modelo raster, utilizando la funcionalidades

vectoriales únicamente para la generación de la cartografía base y la modelización inicial de las variables. Se adopta una resolución óptima de 10 metros para trabajar con cartografía base a escala 1:10.000 y se aplican técnicas y operaciones de análisis local (reclasificación y superposición de mapas), de vecindad inmediata (filtrados y cálculo de pendientes) y de vecindad extendida (distancias euclidianas y análisis de proximidad o buffer).

4.3.2.2. Implementación del modelo

El modelado cartográfico es un término más amplio que los conjuntos de operaciones antes caracterizados; en él se integran en una secuencia lógica una serie de capas, operaciones topológicas y temáticas, información externa al GIS y juicios de valor, con el fin de buscar soluciones a determinados problemas de carácter espacial. Tomlin (1999) explica el modelado cartográfico como una metodología general para el análisis y síntesis de datos geográficos, definiéndolo como el uso de las operaciones básicas de un SIG en una secuencia lógica para resolver problemas espaciales complejos.

4.3.2.2.1. Cartografías del Índice de Riesgo de Contaminación (IRCj)

Tras la modelización y reclasificación de cada una de las variables de localización se ponderan, mediante los algoritmos del map calculator (ESRI 2002) y el operador producto, para cada W_j , obteniéndose las cartografías de los Índices de Riesgo de Contaminación. Cada variable de localización genera tantas cartografías como afectaciones a los elementos del medio, mostrando en cada píxel el valor asociado a este índice. En la Figura 4.4 se recoge el IRC para la variable erosión en el caso del elemento del medio suelo.

4.3.2.2.2. Cartografías de los Índices de Probabilidad de Contaminación para los diferentes elementos del medio (Pbci)

Posteriormente se agrupan mediante superposición aritmética y se obtienen las cartografías de los Pbci, una imagen para cada elemento del medio. En la zona de vertido el indicador de probabilidad de contaminación para el agua superficial se califica como improbable, de baja probabilidad para las aguas superficiales, suelo y

salud y con valor más alto, calificado como probable, en el caso de la atmósfera. Estos resultados muestran como la ubicación del punto de vertido no presenta en general características que faciliten la contaminación en los diferentes elementos del medio, salvo en el caso de la atmósfera; en este último caso la elevada pluviometría, el riesgo sísmico de la zona y las características de los vientos, pueden facilitar la afección del vertedero a dicho elemento del medio.

4.3.2.2.3. Cálculo de los Valores Ambientales (Vai) y Cartografías de los Índices de Riesgo Ambiental (IRAi) para los diferentes elementos del medio

Con los valores obtenidos se determinarán los IRAi mediante superposición aritmética de los Vai, y para cada uno de los elementos del medio. Los IRAi obtenidos muestran valores finales de riesgo de contaminación para cada elemento del medio en particular. En este caso se tendrá además en consideración el Va de los diferentes elementos del medio, que son muy altos en el caso de la salud y la atmósfera, alto para las aguas subterráneas, bajo para el suelo y finalmente muy bajo para las aguas superficiales. Esto da lugar a que finalmente los IRAi se hayan calificado como muy bajos en el caso de las aguas superficiales, subterráneas y suelo; para el elemento del medio salud humana se califica como bajo y alto en el caso de la atmósfera. De nuevo es la atmósfera el elemento del medio que tiene mayor riesgo de verse afectado, no sólo por un valor de probabilidad mayor, sino también debido a un Va muy alto. En las Figuras 4.5 y 4.6 se recoge la cartografía para el IRA en el caso de los elementos del medio aguas superficiales y subterráneas, respectivamente.

• Cartografía del Índice de Idoneidad de Ubicación de Vertederos (IUV)

Para concluir el modelo y obtener la cartografía IUV se aplican técnicas de evaluación multicriterio (EMC) tomando como factores los IRAi para cada elemento del medio. El valor asociado a cada píxel del mapa indica finalmente el grado de idoneidad del mismo. Tal y como se observa en la Figura 4.7, los resultados obtenidos en la aplicación muestran un IUV de 6.68 para la ubicación del vertedero de rechazo actual, calificada como de idoneidad alta.

Los análisis de sensibilidad están directamente relacionados con la elaboración de modelos en cualquier campo

científico. Un modelo siempre es una versión simplificada de la realidad que nos permite describir y comprender mejor un determinado problema, tomando los elementos y mecanismos esenciales de los sistemas del mundo real, tanto físicos, como sociales, económicos, o medioambientales. Para demostrar que esos modelos son representaciones fiables de aquellos sistemas reales, es necesario llevar a cabo determinados procesos de validación que les proporcionen la suficiente credibilidad. En el presente trabajo se realizó una verificación de la metodología, una validación de los resultados y un análisis de estabilidad del modelo que no se adjunta en este documento.

La metodología presentada muestra su aplicabilidad

4.4. Conclusiones

para analizar la idoneidad de un lugar para ubicar un vertedero gracias a la obtención de un índice final de idoneidad. No obstante, en análisis del resto de los índices obtenidos facilita también el estudio de los problemas que puedan plantearse a nivel de los diferentes elementos del medio, lo que finalmente se traducirá en una toma de decisiones en relación a la posibilidad de ubicar o no un vertedero.

Las cartografías obtenidas en la aplicación práctica al caso de Granada muestran además la capacidad de los sistemas de información geográfica para la ubicación óptima de tan singular equipamiento y nos hace intuir la potencialidad de este instrumento que permitirá a los planificadores, tomadores de decisión u otros actores, profundizar en su conocimiento de la realidad territorial, analizar y emprender acciones, para el correcto emplazamiento de futuros vertederos municipales u otras instalaciones o equipamientos en el territorio.

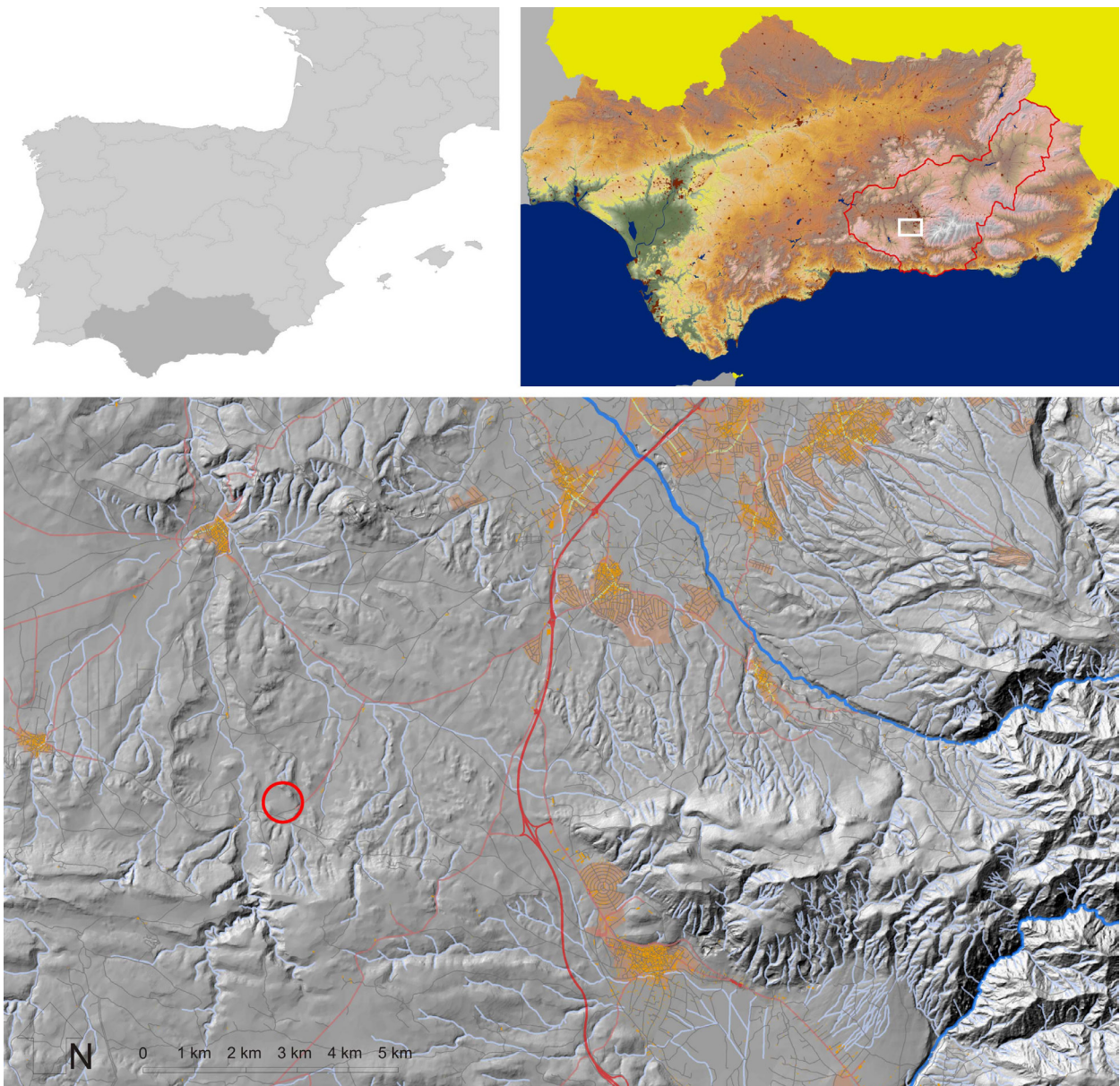


FIGURA 4.1.

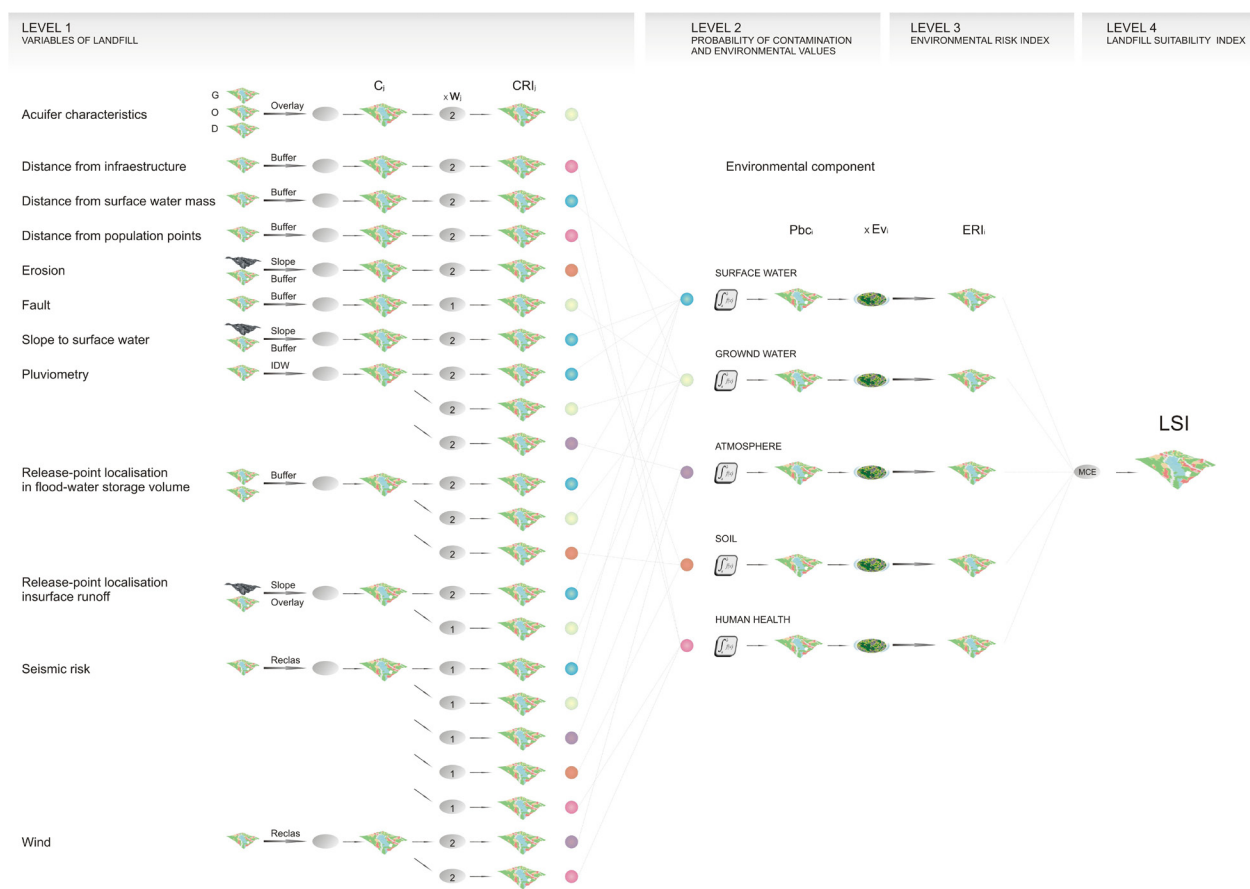


FIGURA 4.2.

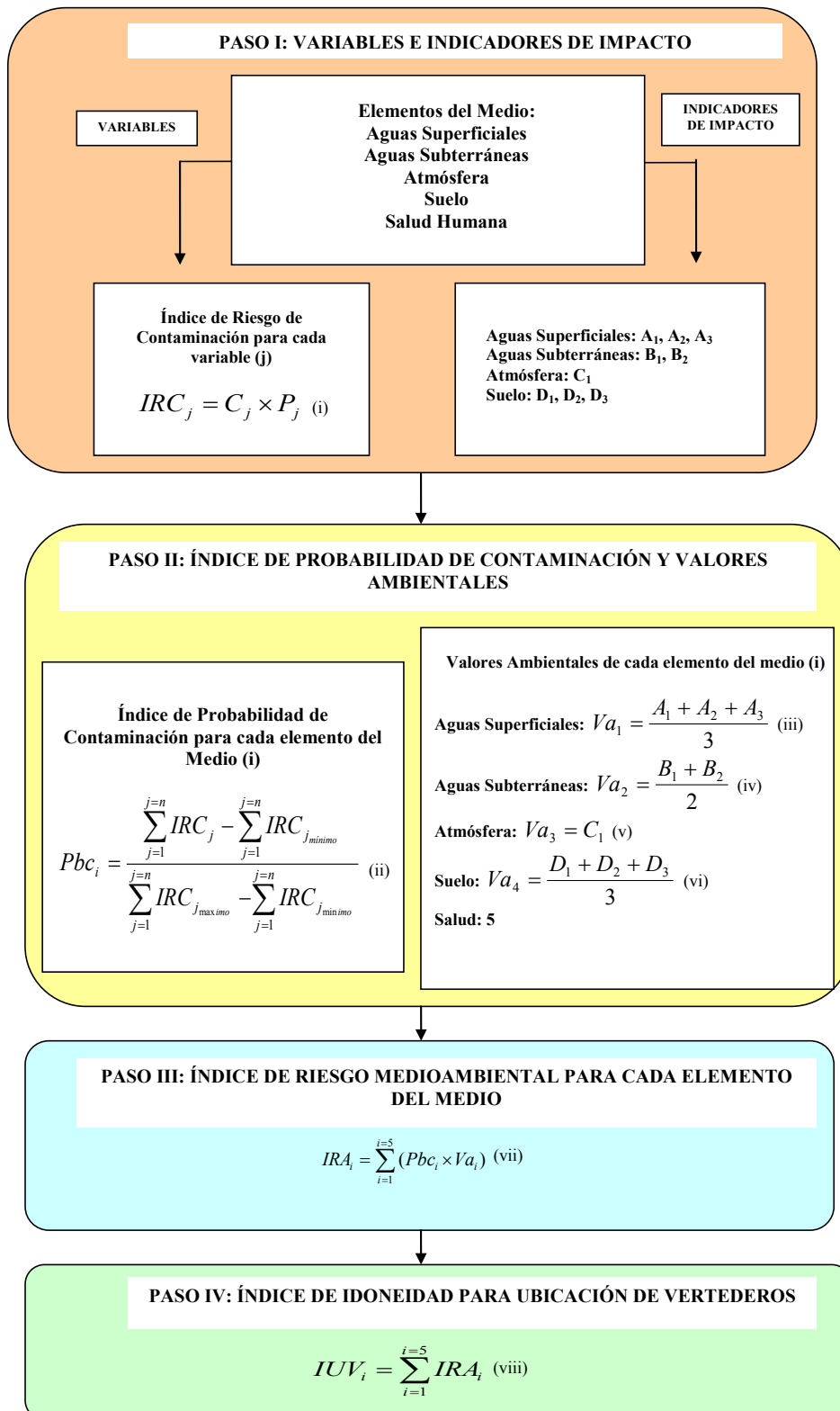


FIGURA 4.3.

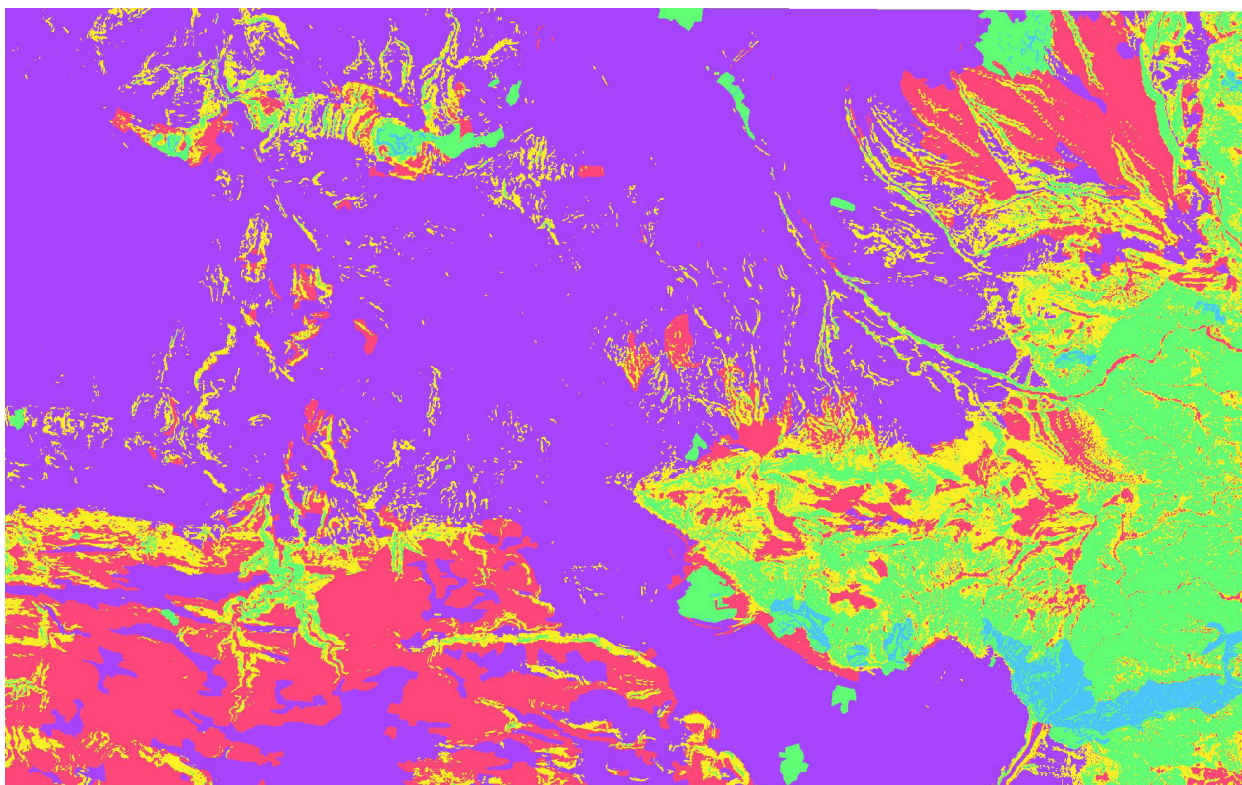
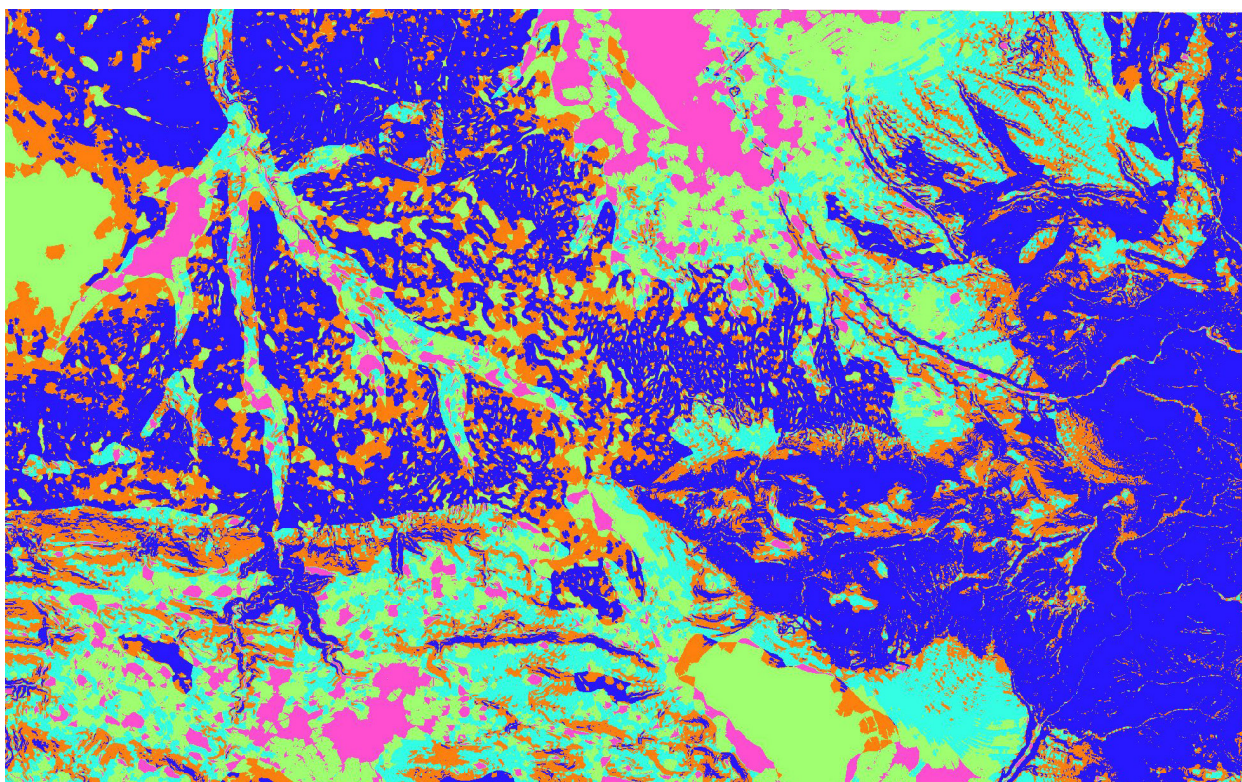


FIGURA 4.4. Cartografía del CRI para la Erosión. Elaboración propia.

FIGURA 4.5. Cartografía del CRI para la Escorrentía superficial. Elaboración propia.



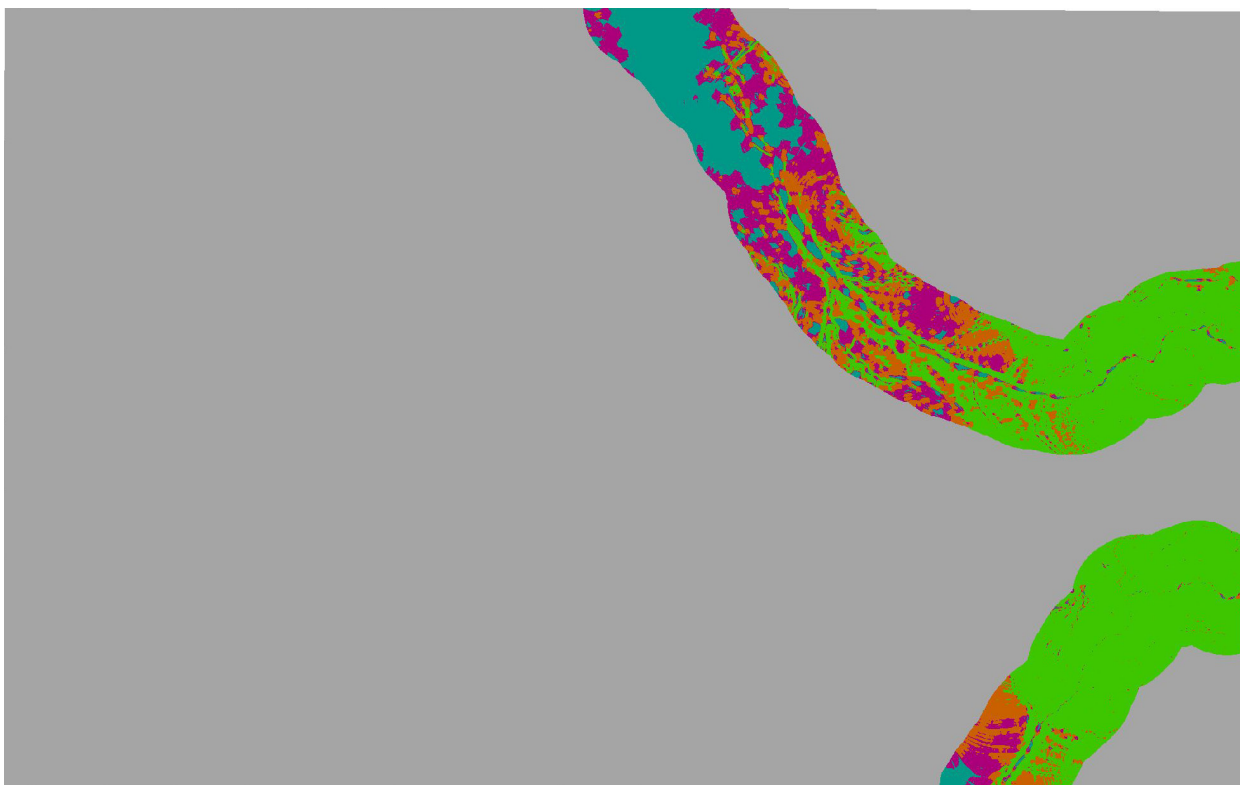
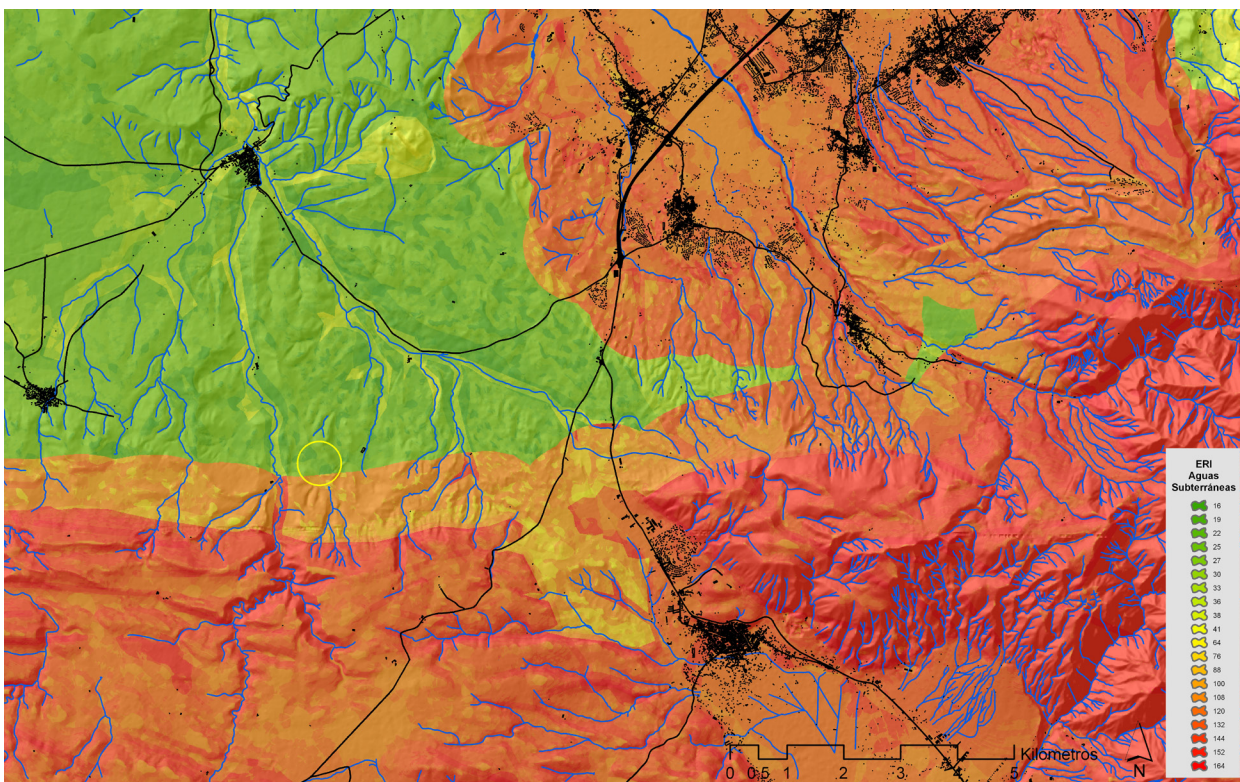


FIGURA 4.6. Cartografía del CRI para la pendiente de cauces superficiales. Elaboración propia.

FIGURA 4.7. Cartografía del ERI para aguas subterráneas. Elaboración propia.



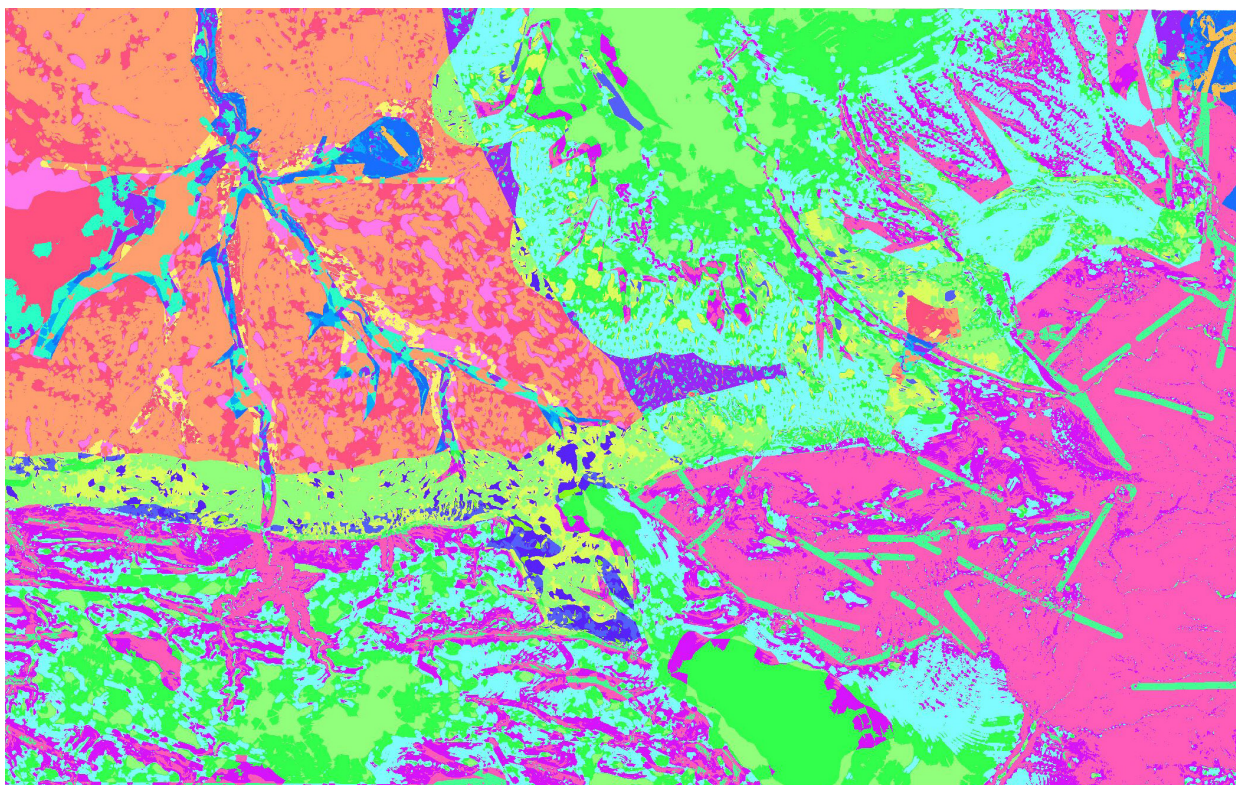


FIGURA 4.8. Cartografía del ERI para aguas subterráneas. Elaboración propia.

FIGURA 4.9. Cartografía del ERI para aguas superficiales. Elaboración propia.

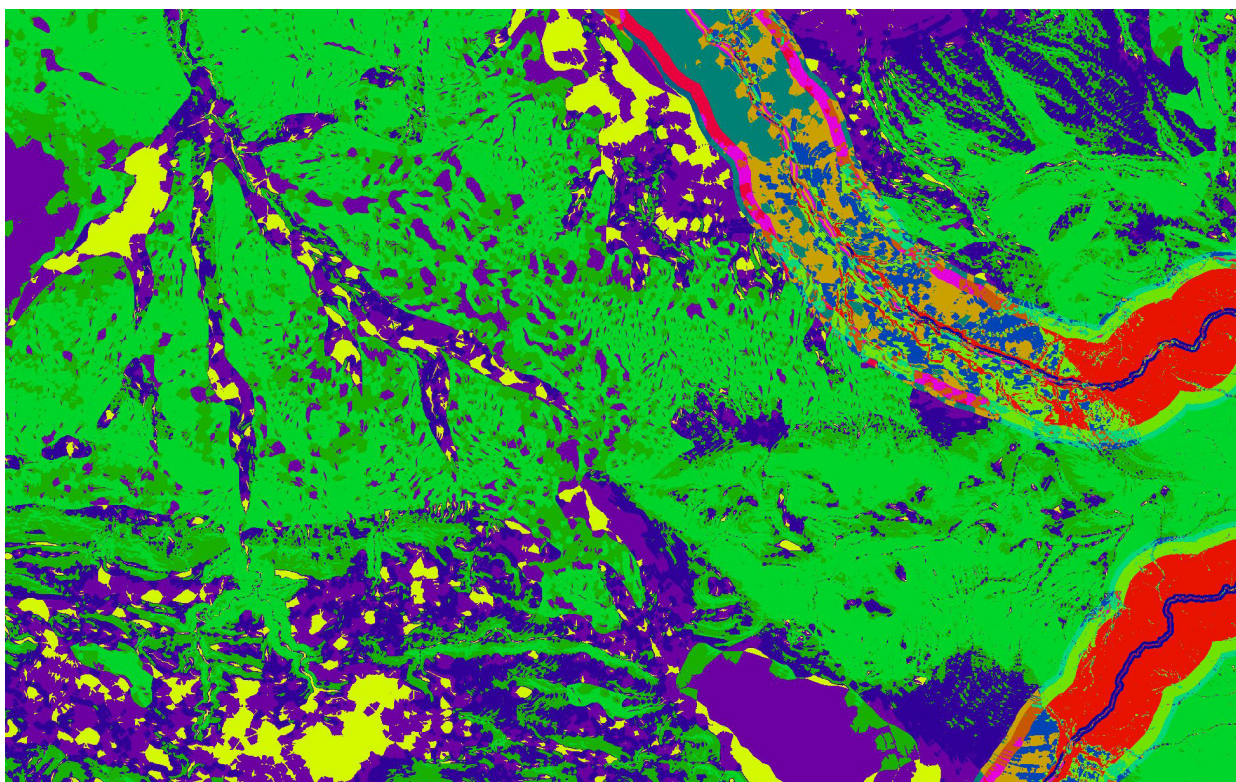




FIGURA 4.10. Cartografía del ERI para la atmósfera. Elaboración propia.

FIGURA 4.11. Cartografía del ERI para la salud. Elaboración propia.



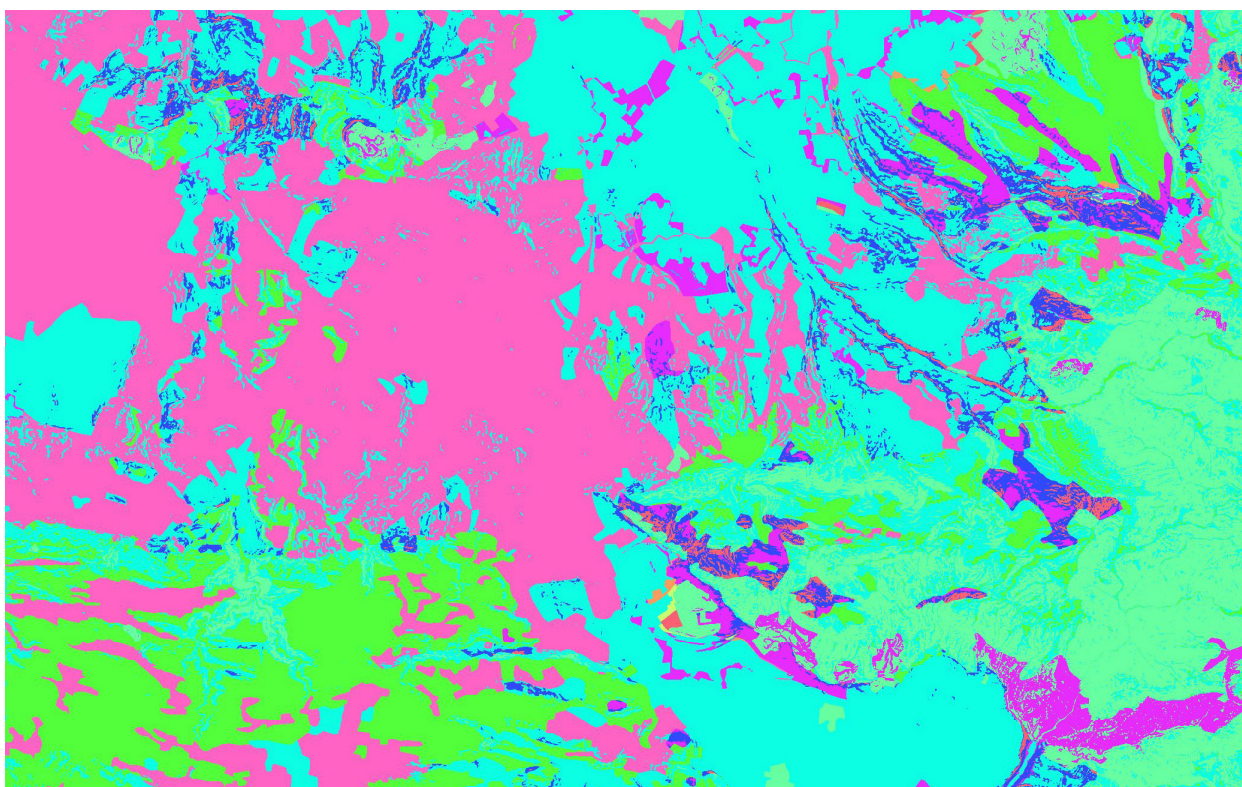
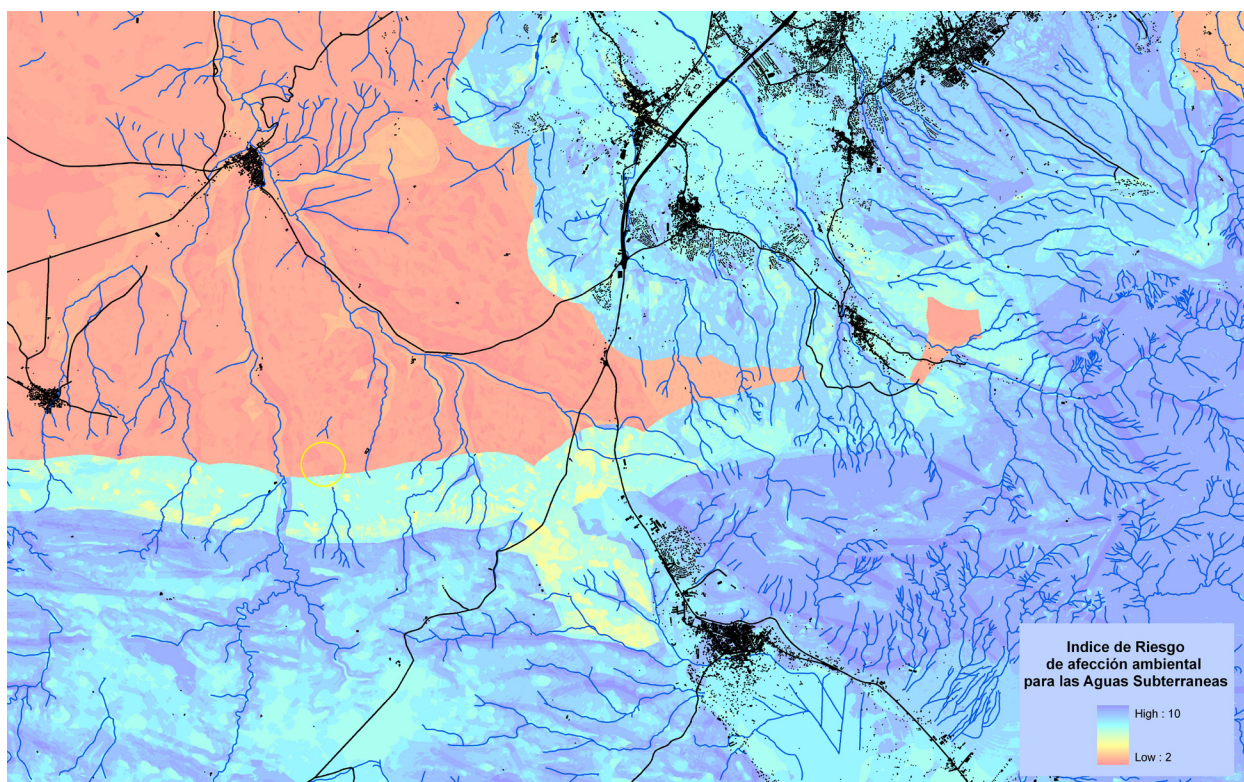


FIGURA 4.12. Cartografía del ERI para el suelo. Elaboración propia.

FIGURA 4.13. Cartografía del Índice de Riesgo de Afección Ambiental para aguas subterráneas. Elaboración propia.



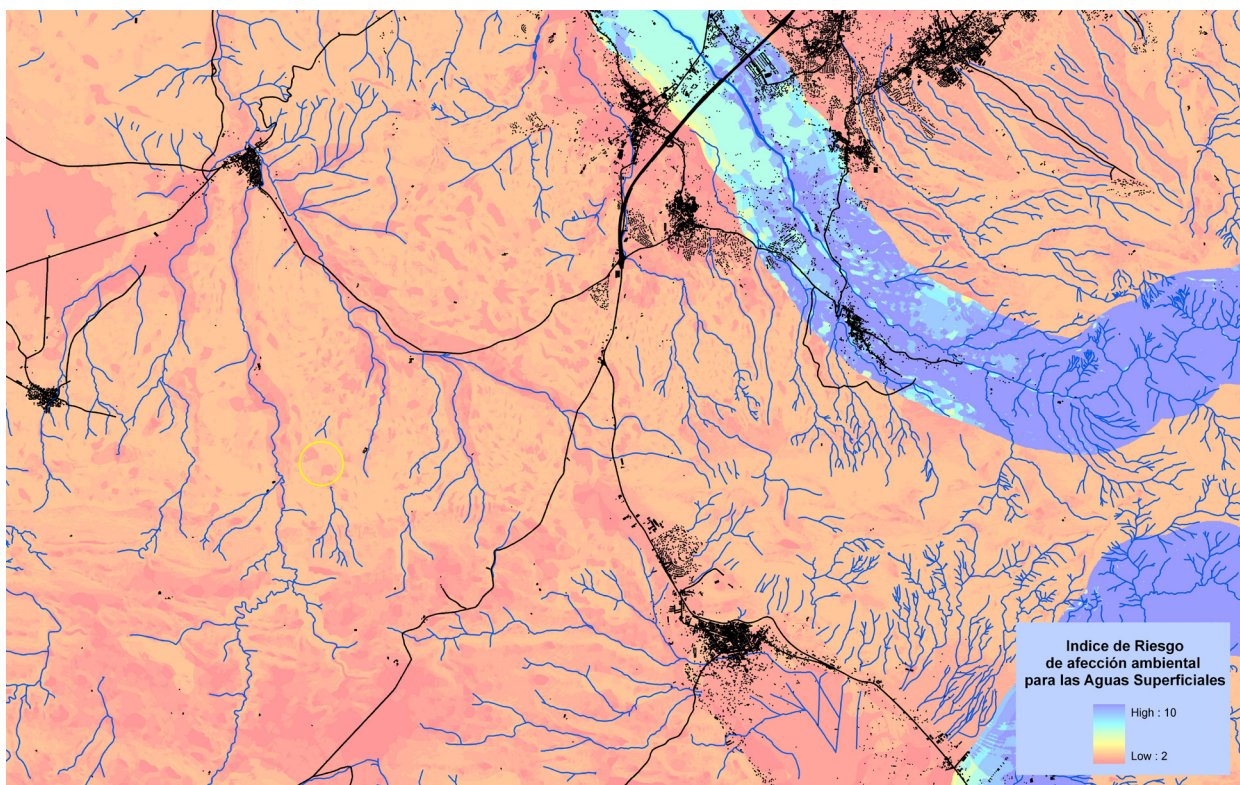
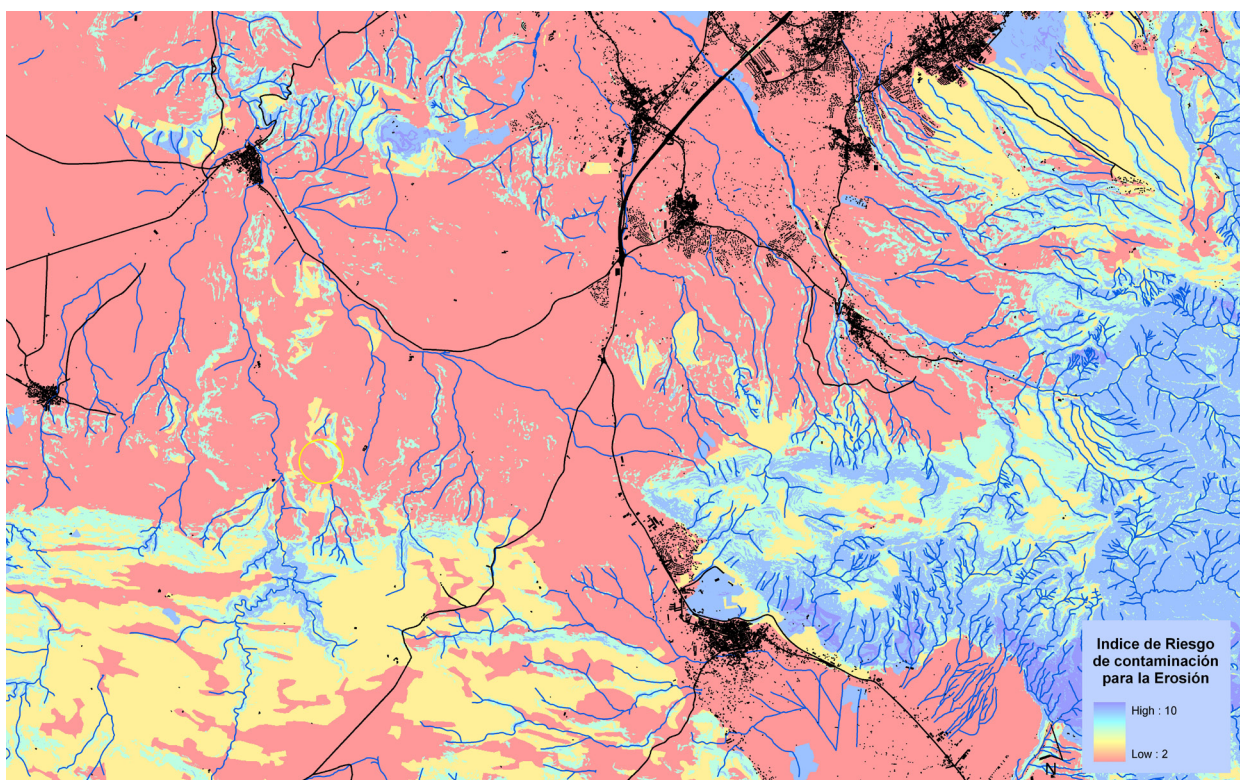


FIGURA 4.14. Cartografía del Índice de Riesgo de Afección Ambiental para aguas superficiales. Elaboración propia.

FIGURA 4.15. Cartografía del IRC para la erosión. Elaboración propia.



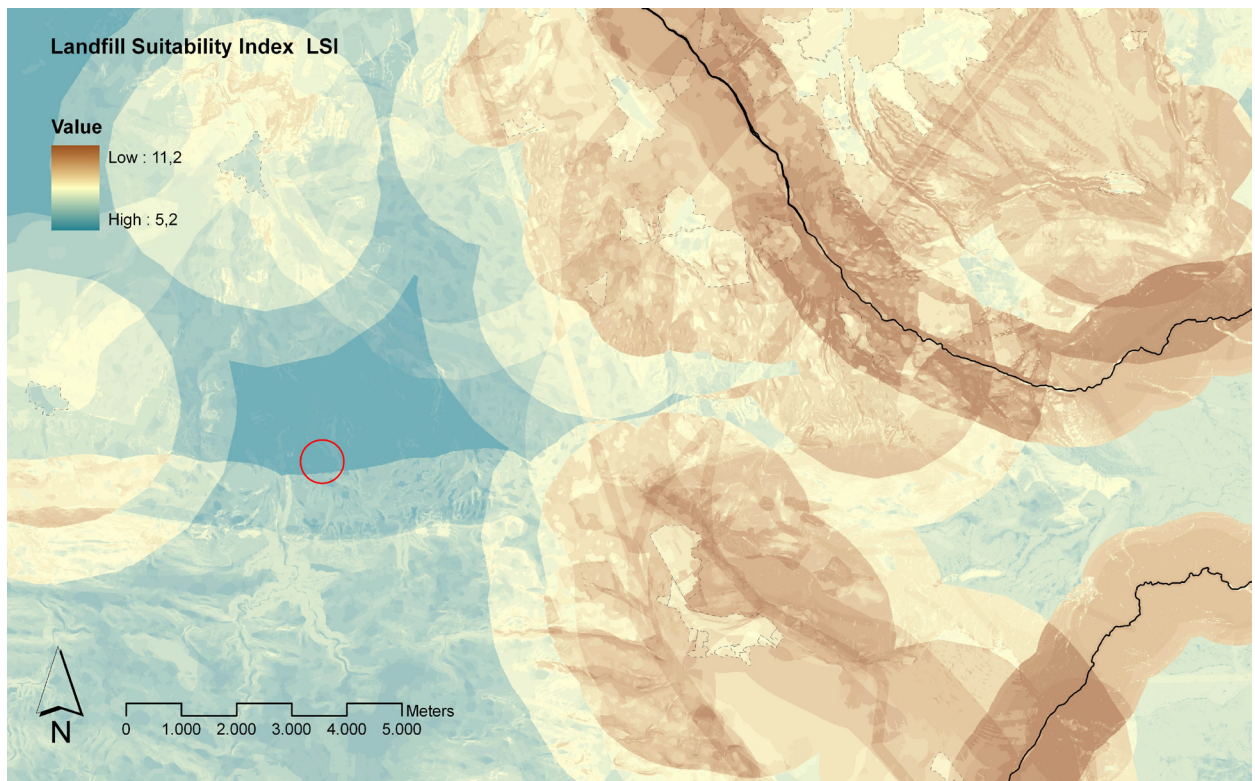


FIGURA 4.16. Cartografía del Landfill Suitability Index (LSI). Elaboración propia.

CAPITULO 5

Escenarios de aptitud: Selección de alternativas y Evaluación multicriterio.....201

5.1. Introducción

5.2. El Proceso de Toma de Decisión

5.3. Los Métodos de Evaluación y Decisión Multicriterio

5.3.1. Ponderación Lineal (scoring),

5.3.2. Utilidad multiatributo (MAUT),

5.3.3. Relaciones de superación

5.3.4. Proceso analítico Jerárquico (AHP - Analytic Hierarchy Process).

5.4. Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. Aplicación a la cuenca del Río Guadalfeo (Granada)

5.4.1. Ámbito de estudio

5.4.2. La modelización de la accesibilidad

5.4.3. La Aptitud para la urbanización

5.4.4. Análisis de la dinámica poblacional.

5.4.5. Incorporación de variables espaciales: Capacidad de carga poblacional y coeficiente de aptitud a la urbanización.

5.4.6. Resultados

5.5. Conclusiones

5 ESCENARIOS DE APTITUD. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS Y EVALUACIÓN MULTICRITERIO

Resumen

La construcción de nuevas infraestructuras de transporte supone una alteración de las condiciones de accesibilidad, ofreciendo nuevas potencialidades para el desarrollo regional.

El objetivo de la experiencia presentada en este capítulo es la generación de unos posibles escenarios de aptitud que, en el ámbito elegido, cuantifiquen estas potencialidades.

Mediante la elaboración de un modelo de accesibilidad y a partir de la sistematización de otras variables que condicionan la ocupación del suelo, se pretende determinar donde se localizan aquellos suelos potencialmente más aptos para acoger nuevos crecimientos urbanos y modelizar su evolución en el tiempo.

Para estimar la superficie urbana demandada en cada uno de los años horizonte, se analiza la dinámica poblacional y su proyección futura mediante variaciones metodológicas de los modelos tradicionales de crecimiento, incorporando novedosas variables espaciales (capacidad de carga poblacional y coeficiente de aptitud a la urbanización) que permiten tener en cuenta las futuras condiciones de accesibilidad.

El método de evaluación y decisión multicriterio (EMC) elegido para la modelización es el denominado proceso analítico jerárquico (AHP), que se basa en la asignación de pesos a los diferentes factores de localización, representados cada uno por una capa de información cartográfica georreferenciada, mediante su comparación por pares.

Las cartografías resultantes permiten finalmente la localización espacial y temporal de las áreas de mejor aptitud hacia la urbanización para cada uno de los municipios considerados.

5.1. Introducción

En este capítulo, se ponen en juego de nuevo los conceptos de capacidad de acogida y de aptitud de territorio tratados en el capítulo anterior pero esta vez con un objetivo diferente.

La utilización de métodos de evaluación y decisión multicriterio y la generación de escenarios temporales acordes a la aptitud del territorio, en un intento de simulación prospectiva, pretenden ser instrumentos útiles en los procesos de planificación y toma de decisiones en territorios complejos y dinámicos, y puede ayudar a disminuir la incertidumbre de las decisiones que guían, por ejemplo, los procesos de urbanización.

La intensa interacción entre transporte y uso del suelo es punto de encuentro en las teorías de planificadores territoriales y del transporte.

Esta acción recíproca es muy significativa en áreas urbanas y metropolitanas, ámbitos sobre los que se han desarrollado las distintas teorías que a ella se aproximan, desde las técnicas de la movilidad urbana, la economía y la sociología (Wegener y Fürst, 1999).

En relación a las primeras, son tradicionales las explicaciones referentes a que las localizaciones con buena accesibilidad tienen mayores posibilidades de ser desarrolladas, con una densidad elevada, que las localizaciones remotas (Hansen, 1959), dándose el clásico proceso cíclico.

Por ello se puede inferir que el impacto del transporte sobre los usos del suelo es mensurable por cambios en la accesibilidad de las localizaciones, de modo que una alta accesibilidad incrementa la atracción de un lugar para la localización de todo tipo de usos del suelo y debería influir en la dirección del desarrollo urbano (Wegener, 2002).

Ante la complejidad de los procesos espaciales, su aproximación mediante un modelo, que ha de considerar integradamente un amplio número de variables y ha de interrelacionar las dimensiones económica, social y medioambiental de la realidad, ha experimentado un importante avance con el desarrollo de los sistemas de información geográfica (S.I.G).

Muchos son los trabajos que demuestran la importancia de estos sistemas en el desarrollo de modelos urbanos, (citados en Serrano 2006) destacando entre otras las aportaciones de Longley (1994) y Batty (1994,1995) que plantean las posibilidades, problemas y perspectivas de la utilización de Sistemas de Información Geográfica en modelos urbanos, los de Sui (1994,1998) sobre las perspectivas de cambio metodológico que aportan estas nuevas tecnologías o los de Johnston y de la Barra (2000) que relacionan modelos de transporte y usos de suelo. Igualmente interesantes son las aportaciones de Pérez et al (2004), Aguilera et al (2006) y Paegelow et al (2008) en cuanto a sus revisiones bibliográficas de modelos desarrollados en diferentes investigaciones sobre la obtención de patrones espacio-temporales de cambios en los usos del suelo.

5.2. El Proceso de Toma de Decisión

“La toma de decisiones es un proceso de selección entre cursos alternativos de acción, basado en un conjunto de criterios, para alcanzar uno o más objetivos” (Simon, 1960).

Un proceso de toma de decisión comprende de manera general los siguientes pasos:

- Análisis de la situación;
- Identificación y formulación del problema;
- Identificación de aspectos relevantes que permitan evaluar las posibles soluciones.
- Identificación de las posibles soluciones;
- Aplicación de un modelo de decisión para obtener un resultado global; y
- Realización de análisis de sensibilidad.

La opinión de una única persona en la toma de decisión puede tornarse insuficiente cuando se analizan problemas complejos, sobre todo aquellos cuya solución puede

afectar a muchas otras personas, por lo que se debe tender a generar discusión e intercambio entre los actores, que por su experiencia y conocimiento pueden ayudar a estructurar el problema y a evaluar las posibles soluciones. Para abordar una situación de un problema de toma de decisión en la que se presentan diversos objetivos o criterios que simultáneamente deben incorporarse, ha surgido la Metodología Multicriterio como sistema de ayuda a la decisión del ser humano.

5.3. Los Métodos de Evaluación y Decisión Multicriterio

Los métodos de evaluación y decisión multicriterio comprenden la selección entre un conjunto de alternativas factibles, la optimización con varias funciones objetivo simultáneas y un agente decisor y procedimientos de evaluación racionales y consistente (Martínez, 1998). Son especialmente utilizadas para tomar decisiones frente a problemas que contienen aspectos intangibles a evaluar.

Los métodos de evaluación y decisión multicriterio no consideran la posibilidad de encontrar una solución óptima. En función de las preferencias del agente decisor y de objetivos pre-definidos (usualmente conflictivos), el problema central de los métodos multicriterio consiste en:

1. Seleccionar la(s) mejor(es) alternativas;
2. Aceptar alternativas que parecen “buenas” y rechazar aquellas que parecen “malas”;
3. Generar una “ordenación” (ranking) de las alternativas consideradas (de la “mejor a la “peor”)

Para ello han surgido diversos enfoques, métodos y soluciones.

Un criterio clasificador en la Decisión Multicriterio corresponde al número, que puede ser finito o infinito, de las alternativas a tener en cuenta en la decisión. Dependiendo de esta situación existen diferentes métodos. Cuando las funciones objetivo, toman un número infinito de valores distintos, que conducen a un número infinito de alternativas posibles del problema se llama Decisión

Multiobjetivo.

Aquellos problemas en los que las alternativas de decisión son finitas se denominan problemas de Decisión Multicriterio Discreta. Estos problemas son los más comunes en la realidad y son los que se consideran en este documento. Los métodos de Decisión Multicriterio Discreta se utilizan para realizar una evaluación y decisión respecto de problemas que, por naturaleza o diseño, admiten un número finito de alternativas de solución, a través de:

- Un conjunto de alternativas estable, generalmente finito (soluciones factibles que cumplen con las restricciones- posibles o previsibles); se asumen que cada una de ellas es perfectamente identificada, aunque no son necesariamente conocidas en forma exacta y completa todas sus consecuencias cuantitativas y cualitativas;
- Una familia de criterios de evaluación (atributos, objetivos) que permiten evaluar cada una de las alternativas (analizar sus consecuencias), conforme a los pesos (o ponderaciones) asignados por el agente decisor y que reflejan la importancia (preferencia) relativa de cada criterio;
- Una matriz de decisión o de impactos que resumen la evaluación de cada alternativa conforme a cada criterio; una valoración (precisa o subjetiva) de cada una de las soluciones a la luz de cada uno de los criterios; la escala de medida de las evaluaciones puede ser cuantitativa o cualitativa, y las medidas pueden expresarse en escalas cardinal (razón o intervalo), ordinal, nominal, y probabilística;
- Una metodología o modelo de agregación de preferencias en una síntesis global; ordenación, clasificación, partición o jerarquización de dichos juicios para determinar la solución que globalmente recibe las mejores evaluaciones;
- Un proceso de toma de decisiones (contexto de análisis) en el cual se lleva a cabo una negociación consensual entre los actores o interesados (analista- “experto”-, decisor y usuario)” (Martínez, 1998).

El análisis o evaluación multicriterio (EMC) se define como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en procesos de decisión (Gómez et al., 2005). Se basa en

la ponderación y compensación de variables que van a influir de manera positiva (Aptitud) o negativa (Impacto) sobre la actividad objeto de decisión y que deben ser inventariados y clasificados previamente.

En el ejemplo que más adelante se expone, el proceso permite, por ejemplo, obtener mapas que expresan la aptitud del suelo para ser urbanizado.

La variación en la asignación de los pesos mediante la comparación por pares de variables hace posible la generación de diferentes modelos de urbanización que serán posteriormente estudiados y comparados.

Los principales métodos de evaluación y decisión multicriterio discretos son los siguientes: Ponderación Lineal (scoring), Utilidad multiatributo (MAUT), Relaciones de superación y el Proceso analítico Jerárquico (AHP - Analytic Hierarchy Process).

5.3.1. Ponderación Lineal (scoring)

Es un método que permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información. En dicho método se construye una función de valor para cada una de las alternativas. El método de Ponderación Lineal supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad. Es un método completamente compensatorio, y puede resultar dependiente, y manipulable, de la asignación de pesos a los criterios o de la escala de medida de las evaluaciones. Es un método fácil y utilizado ampliamente en el mundo.

5.3.2. Utilidad Multiatributo (MAUT)

Para cada atributo se determina la correspondiente función de utilidad (parcial), y luego se agregan en una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa. Al determinarse la utilidad de cada una de las alternativas se consigue una ordenación completa del conjunto finito de alternativas.

El método de utilidad multiatributo supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad, utiliza “escalas de intervalo”, y acepta el principio de “preservación

de orden” (rank preservation). La condición de independencia preferencial mutua entre los atributos suele aceptarse casi axiomáticamente, e implícitamente es cuestionable y no refleja la estructura de preferencias del agente decisor.

El rigor y rigidez de los supuestos teóricos de este método usualmente controvertidos y difíciles de contrastar en la práctica, lo que obliga a relajarlos, requiere un elevado nivel de información del agente decisor para la construcción de funciones de utilidad multiatributo, aunque permiten abordar fluidamente cuestiones de incertidumbre y riesgo.

No obstante las dificultades en su utilización este método cuenta con una variedad de experiencias prácticas en Estados Unidos e Inglaterra” (Martínez, 1998).

5.3.3. Relaciones de Superación

Estos métodos usan como mecanismo básico el de las comparaciones binarias de alternativas, es decir comparaciones dos a dos de las alternativas, criterio por criterio. De esta forma puede construirse un coeficiente de concordancia asociado con cada par de alternativas. Existen dos métodos propios de la escuela francesa: ELECTRE y PROMETHEE.

Del método ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) ya existen varias versiones que usan pseudocriterios y la teoría de conjuntos difusos.

El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) se ha aplicado, con predicción para problemas de ubicación.

5.3.4. El Proceso Analítico Jerárquico (AHP- Analytic Hierarchy Process)

Este método, elegido para la aplicación práctica que se presenta a continuación, fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty en 1980 y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante su descomposición en un modelo jerárquico.

El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma

visual, mediante la construcción de un modelo que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas.

Una vez construido el Modelo Jerárquico, se realizan comparaciones por pares entre dichos elementos (criterios-subcriterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por las personas, entregando una síntesis de las mismas mediante la agregación de esos juicios parciales. Es decir, las evalúa y entrega una ordenación de las alternativas de solución desde la mejor hasta la peor.

Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica propuesta por el mismo Saaty, que va desde 1 hasta 9.

La ventaja del AHP consiste en que adicionalmente permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse por fuera de los análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes para algunos actores involucrados en la toma de decisión, como es el caso de riesgo, incertidumbre, equidad, participación, entre otros.

- Validación de los resultados: tratamiento del error y la incertidumbre.

Evaluación del modelo: En la evaluación se examinan los elementos del problema aisladamente por medio de comparaciones por pares. Las evaluaciones o juicios son emitidos por cada analista o grupo de interés. De esta forma, el éxito en esta etapa dependerá de la inclusión de los grupos de interés o decisores que se verán representados en el modelo construido y podrán evaluar el modelo consensuado de acuerdo con sus intereses y necesidades propios.

Análisis de sensibilidad: Para comprobar la estabilidad del modelo (o su comportamiento predictivo), se examina la variación que se produce en los resultados cuando se realizan variaciones sistemáticas en un rango de interés sobre uno o varios parámetros de entrada. Estas variaciones suelen realizarse sobre los pesos otorgados a los factores. Los resultados indicarán qué partes del modelo habrá que seguir perfeccionando.

Análisis de Incertidumbre: Este término hace alusión al análisis de cualquier error (conocido o no), ambigüedad o variación en una base de datos y en la regla de decisión, y son interesantes herramientas para interpretar el nivel de riesgo derivado de la aplicación del modelo y con unos determinados datos de partida. Esta propuesta, llevada a la práctica o no en posteriores etapas, tiene como objetivo sustituir los procesos de verificación al uso, para los que se necesitan gran cantidad de información de partida sobre el error en los datos y parámetros del modelo, por un análisis más asequible, pero no por ello menos útil (Barredo et al., 2005).

a) **Análisis de incertidumbre en los datos de partida:** Consiste en la introducción de una serie de perturbaciones en los datos de entrada, tanto en su componente espacial como temática, de forma que sea posible cuantificar su impacto en los resultados del modelo. Esto sería posible mediante el establecimiento de unos puntos de control y la realización de un proceso de distorsión geométrica (para la componente espacial), y mediante la introducción de perturbaciones aleatorias en cada uno de los factores.

b) **Análisis de incertidumbre en las especificaciones del modelo:** Consiste en introducir algunas modificaciones respecto a la modelación de determinadas variables y observar la repercusión en los resultados de la utilización de otro método de EMC diferente al propuesto inicialmente y considerado como un método “borroso”, es decir, el objetivo sería tratar la incertidumbre relacionada con el modelo a partir de la teoría de la lógica borrosa. Con la comparación de los resultados se aprecia si el modelo ofrece garantías suficientes para tomar una decisión final con un grado elevado de confianza en los resultados.

5.4. Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. Aplicación a la cuenca del Río Guadalfeo (Granada)

Esta aplicación práctica, que fue desarrollada dentro del “Estudio Piloto para la Gestión Integrada del río Guadalfeo” financiado por la Consejería de Obras Públicas y Transporte de la Junta de Andalucía que precisaba de distintos escenarios futuros (población, agricultura, ocupación de suelo, etc.) para la implementación de un modelo de gestión integrada de dicha cuenca hidrográfica.

5.4.1. Ámbito de estudio

La puesta en servicio de varios tramos de la A-7 (que completarán con un retraso de varias décadas la Autovía del Mediterráneo) y la A-44 (Bailén-Motril, una importante conexión interior-costa), en la región más meridional de la provincia de Granada, modificará de una forma muy considerable las condiciones de accesibilidad de comarcas como La Costa, el Valle de Lecrín y Las Alpujarras. Un total de 50 municipios agrupados en torno a la cuenca hidrográfica del río Guadalfeo se podrían beneficiar de esta nueva situación (Figura 5.1).

5.4.2. La modelización de la accesibilidad

Siguiendo el modelo desarrollado en el capítulo 3, para la modelización de la accesibilidad se ha considerado el territorio como una matriz de elementos discretos o malla (en este caso de 10 x 10 m en sintonía con la resolución del Mde de la Junta de Andalucía) asignándole a cada celda o píxel un valor que representa la resistencia al desplazamiento en términos de tiempo y que se denomina superficie de fricción.

Sobre esta superficie generada o superficie de fricción (Figura 5.2) y seleccionando previamente unos polos u objetivos, se aplica el algoritmo costo-distancia. En una primera fase del estudio, se eligieron y ensayaron dife-

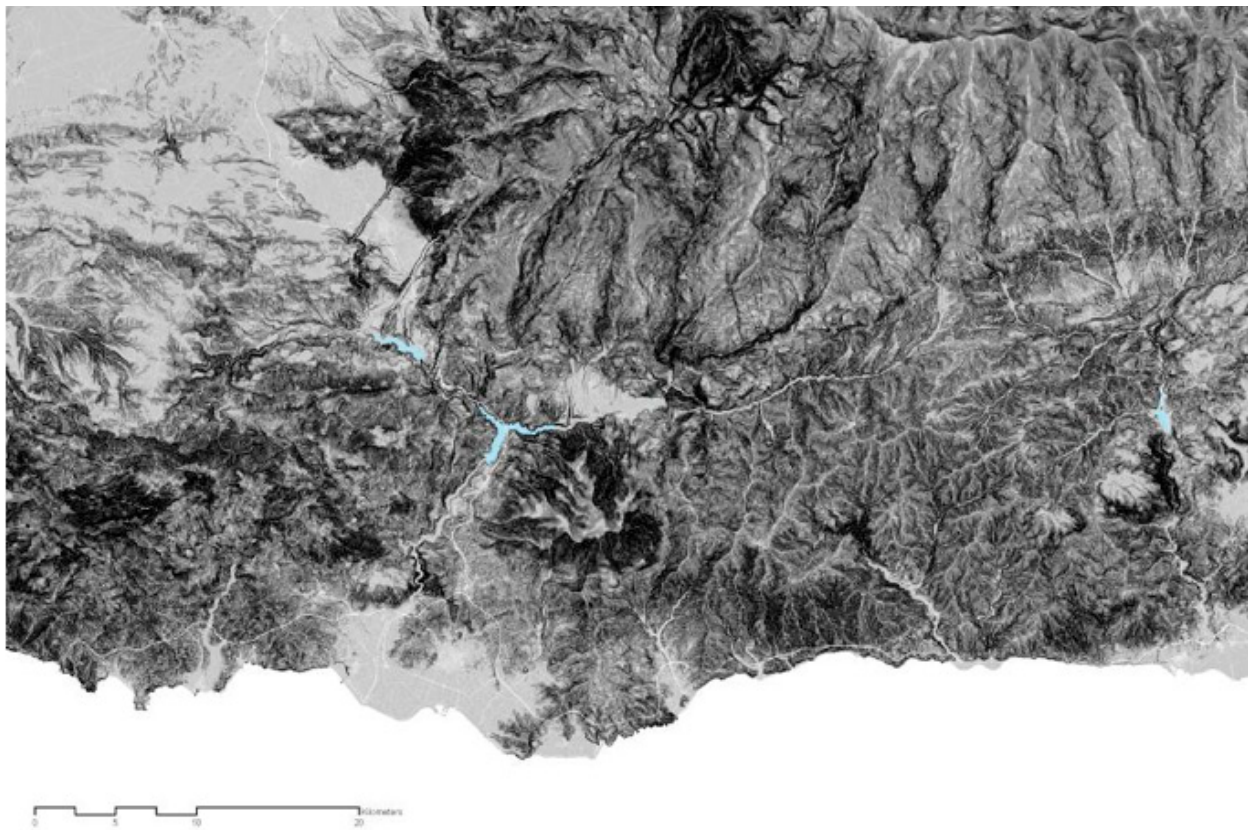
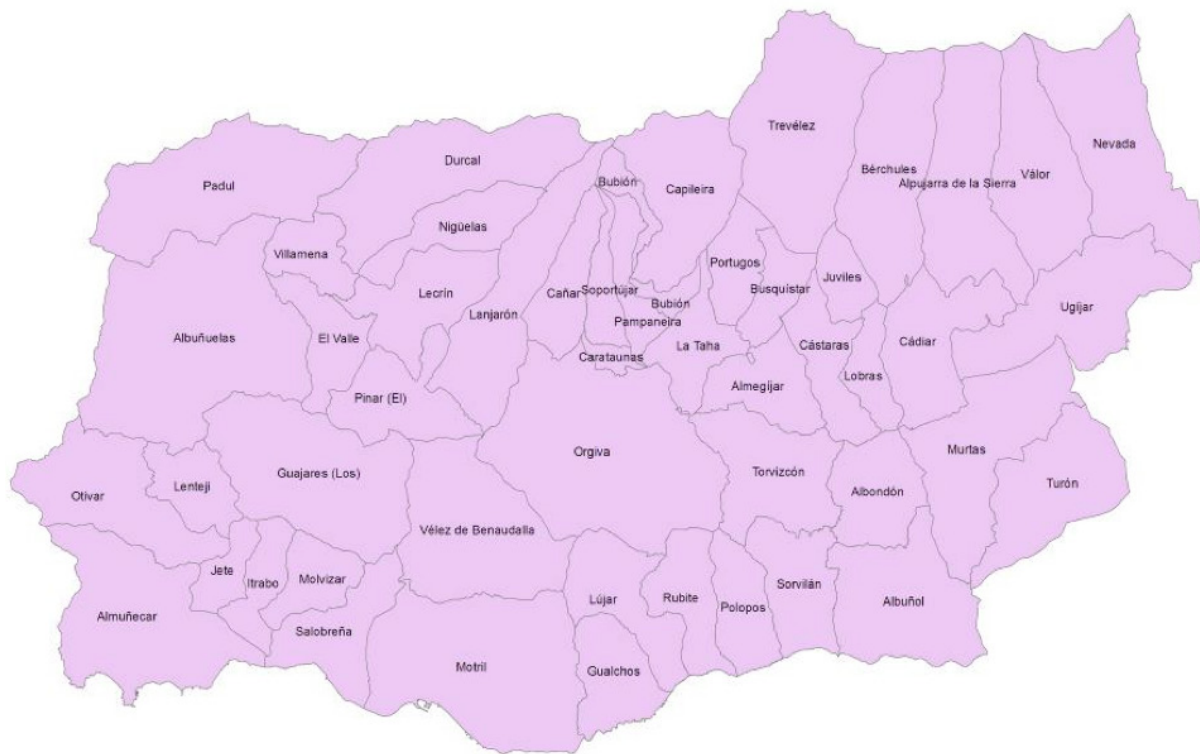


FIGURA 5.1. Ámbito de estudio en Cuenca del río Guadalfeo y municipios implicados. Elaboración propia.

FIGURA 5.2. Superficie de fricción para el modelo de accesibilidad. Elaboración propia.



FIGURA 5.3. Esquema metodológico simplificado del Modelo de Accesibilidad. Elaboración propia. (Arriba) Red viaria considerada. Actual y futura.

rentes objetivos o polos, en base a las distintas características de los flujos generados por cada uno de ellos:

- Los viajes con origen-destino en Granada Capital y su área de influencia se consideraron como viajes de carácter más frecuente, incluso de carácter pendular, con destino a una segunda residencia en la zona costera o a desplazamientos de fin de semana o incluso de jornada única. Serían pues viajes más relacionados con la residencia.

- Por otro lado, los viajes con origen-destino en el Aeropuerto de Málaga se consideraron como viajes de carácter más esporádico y menos repetitivo, más bien relacionados con un turismo vacacional de más larga estancia, y consiguientemente asociados más a la infraestructura hotelera de la zona, y menos a la posesión de una segunda residencia.

- Finalmente, para tomar un factor que realmente exprese la accesibilidad de cada parcela del territorio, se eligieron como objetivos, por un lado, los nudos de la autovía como los lugares que dan acceso a la red de alta capacidad, y por tanto donde se alcanza la accesibilidad máxima al conjunto de ámbitos territoriales más dinámicos de su entorno (áreas metropolitanas de Málaga, Granada y Almería) en unos intervalos de tiempo muy similares (entre 30 y 45 minutos), y por otro, los entornos urbanos para evidenciar la mayor probabilidad de que se urbanice una zona contigua a otra ya edificada.

Este estudio se realiza bajo el entorno de trabajo del software ArcGIS 9 y de su módulo Spatial Analyst que permite trabajar tanto con datos de tipo vectorial como raster.

En la Figura 5.3 se ilustra el diagrama metodológico aplicado.

5.4.3. La Aptitud para la urbanización

A partir de la sistematización de las distintas variables territoriales que condicionan la ocupación del suelo y gracias a las herramientas propias de los S.I.G, se pretende determinar donde se localizan aquellos suelos potencialmente más aptos para acoger nuevos crecimientos urbanos.

5.4.3.1. Variables territoriales

Además de la propia cartografía del crecimiento urbano, que se ha considerado como la variable a explicar o dependiente, se ha construido una base de datos cartográfica de la zona de estudio que incluye distintas variables (físicas, ambientales y antrópicas), que serán empleadas en la fase de análisis como posibles variables explicativas del crecimiento urbano.

En primer lugar, se consideran variables de proximidad, ya sea física (distancia a zonas urbanas), o en tiempo (accesibilidad), por ser uno de los principales condicionantes del crecimiento urbano (Aguilera, 2006). Así mismo, los documentos de planeamiento deben orientar los procesos urbanos, por lo que han sido incluidos en el análisis recogiendo el suelo urbanizable previsto en los mismos. Aunque las actividades económicas son también uno de los principales motores de crecimiento y desarrollo no se consideran en el análisis debido a la complejidad que añadiría al modelo. Finalmente también se han considerado algunas variables ambientales: pendientes, orientaciones y amplitud visual al mar, con el objetivo de cuantificar tanto posibles obstáculos naturales al crecimiento urbano como marcadas potencialidades.

Para determinar el grado de correlación existente entre las distintas variables y el crecimiento urbano, se adoptan los resultados de los estudios realizados por Aguilera (2006) mediante regresión logística espacial, y los de Grindlay et al., (2004). Cheng et al. (2003) ya señalan la importancia del hecho de conocer y comparar los distintos factores determinantes del crecimiento urbano, y emplean para el caso de Wuhan City (China) la regresión logística como método de análisis. En otros estudios como los de López et al, (2001) también se han empleado métodos de regresión (en este caso lineal) para predecir el crecimiento urbano en función del crecimiento poblacional, obteniendo unos resultados muy satisfactorios. El modelo de regresión logística utilizado viene incorporado en el software Idrisi, dentro del módulo Change/TimeSeries con la denominación "Logisticreg". El comando permite introducir una variable dependiente, que se trata de explicar (variable binaria de crecimiento urbano), un conjunto de variables explicativas y una máscara de análisis, para excluir ciertas zonas del proceso de cálculo.

5.4.3.2. Evaluación multicriterio

El proceso seguido tras la definición del problema se puede resumir en cuatro etapas de las cuales la última no se refleja en esta experiencia y de la que dan buena cuenta Gómez et al, (2004):

- Selección de criterios: definición de factores y limitantes
- Generación de la información cartográfica o factores de localización
- Integración de la información en un S.I.G. y obtención del modelo
- Validación de los resultados: Tratamiento del error y la incertidumbre

5.4.3.3. Selección de criterios: Definición de factores y limitantes

Antes de proceder a la evaluación de la capacidad de acogida es necesario definir qué criterios (factores de localización y criterios limitantes) van a ser tenidos en cuenta. Estos criterios están asociados a entidades geográficas y a las relaciones entre entidades y, por tanto, pueden representarse en forma de capas temáticas. La evaluación multicriterio en el entorno de los S.I.G., se basa en que cada factor venga representado por una capa de información cartográfica georreferenciada, en la cual todos los puntos del territorio toman un valor con respecto a la actividad objeto de decisión (Gómez et al, 2005).

Los factores de localización que intervienen en este modelo son:

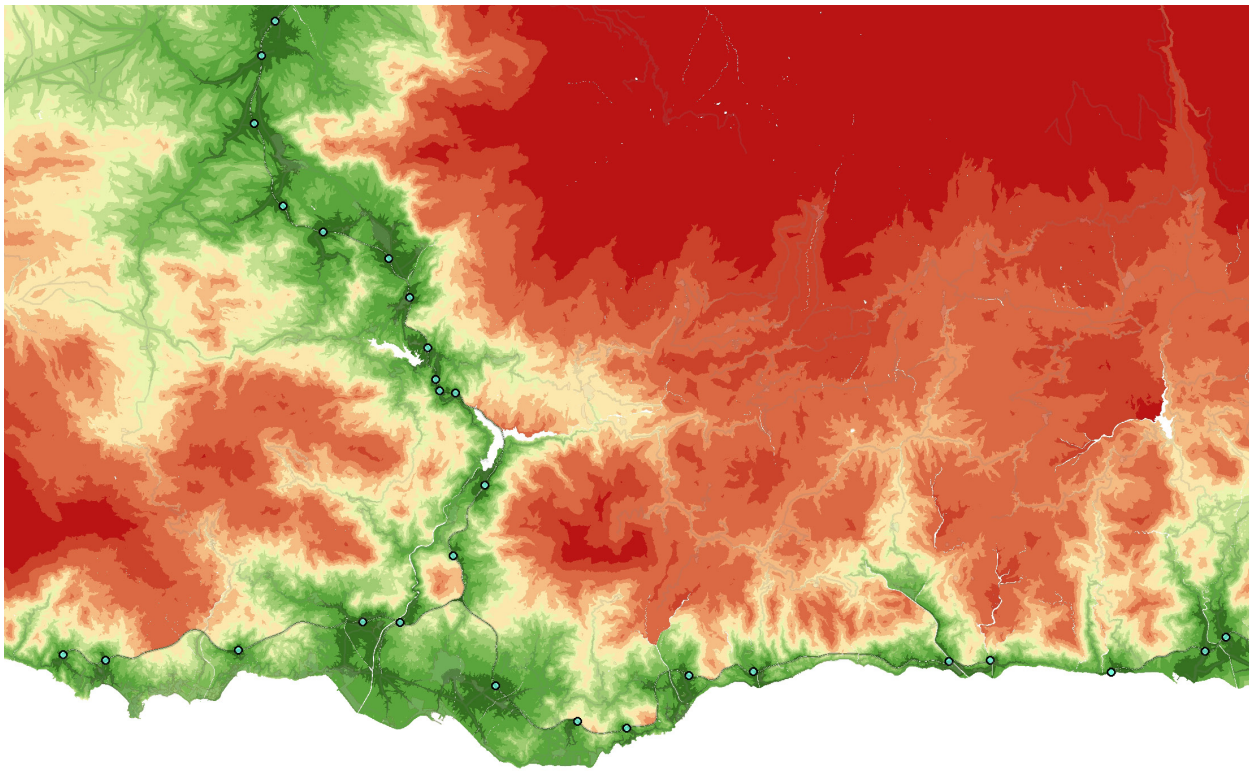
- Accesibilidad a los nudos: Con la superficie de fricción del modelo anterior y tomando como objetivo los nudos de la autovía, se obtiene mediante el algoritmo costo-distancia, la accesibilidad a los nudos de comunicación, en tiempo de viaje (Figura 5.4). Este factor lleva implícita la variable pendiente.
- Accesibilidad a entornos urbanos: Entendida como tiempo de viaje a los núcleos de población. Se genera igualmente a partir de la superficie de fricción, tomando como objetivo los núcleos de población (Figura 5.5).
- Usos: Usos del suelo y superficies clasificadas en el

planeamiento como urbanizables. Esta variable se generó, mediante agrupación de las categorías del mapa de usos y coberturas vegetales del suelo de la Consejería de Medio Ambiente y completado, en gran medida mediante digitalización, con el planeamiento vigente (en formato raster) cedido por los Ayuntamientos. (Figura 5.6).

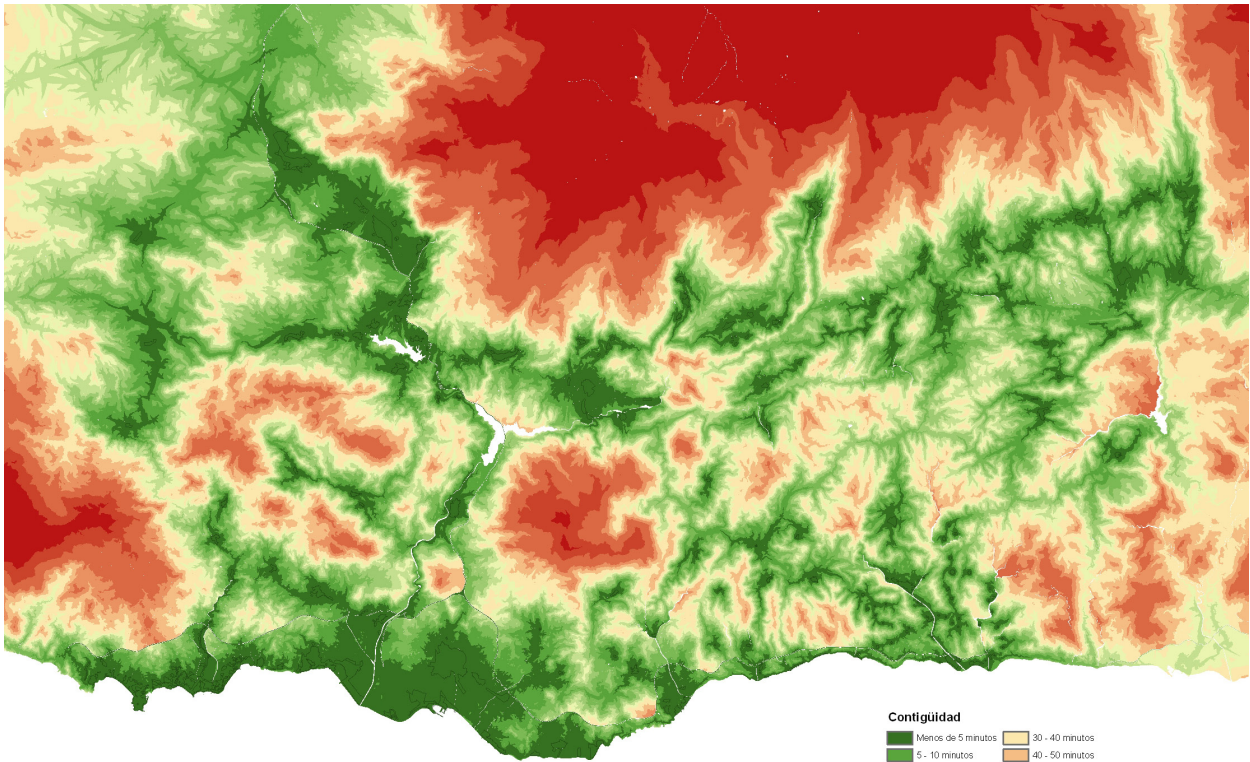
- Orientación: Generada a partir del modelo digital de elevaciones de 10 metros de resolución mediante el algoritmo Derive Aspect.
- Fruición visual o amplitud visual al mar: A partir del modelo de elevaciones y tomando 100 puntos (situados sobre el nivel del mar) pertenecientes a curvas paralelas a la línea de costa, se calcula la exposición visual de cada celda a estos puntos. Se obtiene un mapa que contiene en cada celda el número de porciones de mar que son visibles desde ella. La gama de valores posibles va desde 0 (sin visibilidad al mar) hasta 100 (amplitud visual máxima). Se restringe a zonas distantes menos de 20 Km. a la línea de costa. Una primera lectura de este mapa nos permitirá ubicar zonas potencialmente atractivas visualmente (Figura 5.7).

Los criterios limitantes (restricciones) considerados se corresponden a mapas binarios (0/1) de las zonas excluidas del análisis (valor 0). Se reflejan en la figura 5.8 y son los siguientes:

- L1. Embalses y superficies de agua. Dominio público hidráulico y zona de servidumbre: Buffer de 100 metros a los cauces principales y 50 metros a los restantes. Se consideran vegas fluviales y llanuras de inundación.
- L2. Viario, vías pecuarias (cañadas, veredas, cordeles y coladas) y dominio público viario (Ley 8/2001). Para delimitar la zona de no edificación se genera un buffer de 100 metros alrededor de las vías de gran capacidad y de 50 sobre las vías convencionales. Para las vías pecuarias (Ley 3/1995) se genera un buffer según la anchura de dichas vías, obteniendo umbrales de 10, 20, 30, 40, 50 y 80 m.
- L3. Superficies de especial protección. Las definidas en el planeamiento como de especial protección y las incluidas en espacios naturales protegidos.
- L4. Dominio público marítimo terrestre: De igual forma



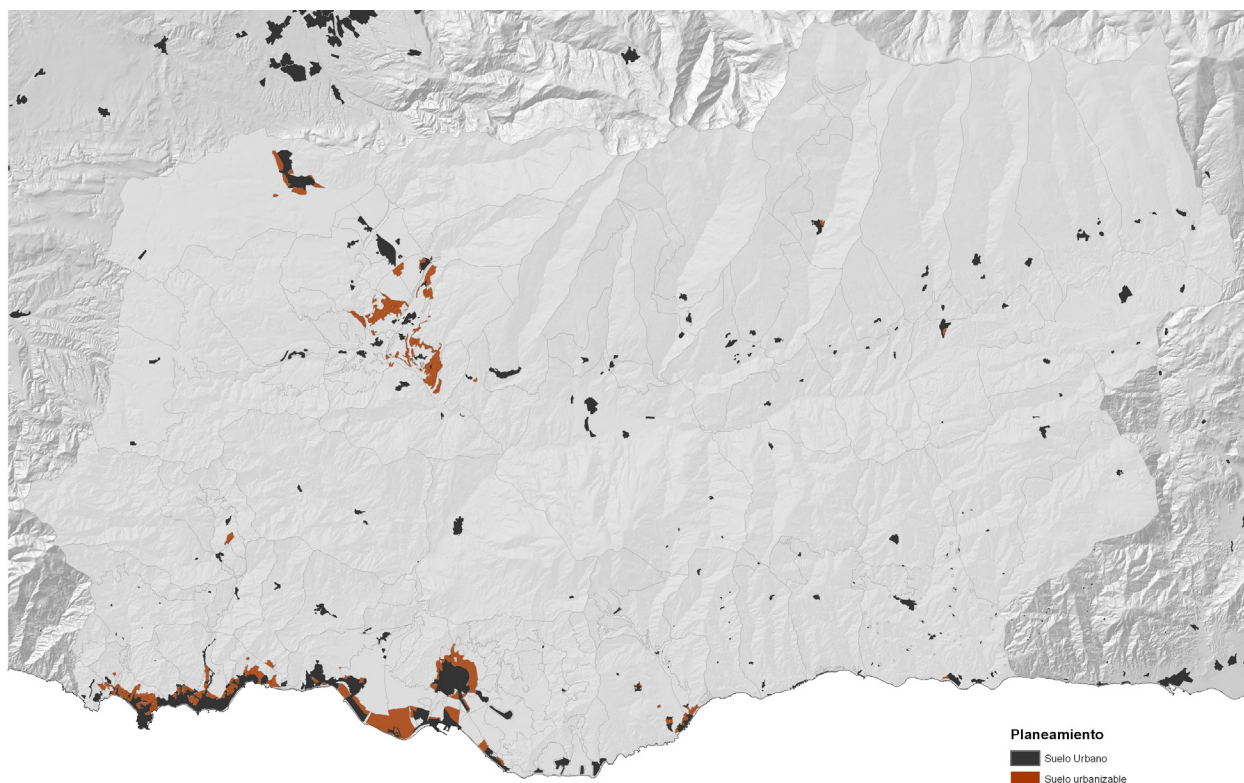
0 5 10 20 Kilometers



Contigüidad

Menos de 5 minutos	30 - 40 minutos
5 - 10 minutos	40 - 50 minutos
10 - 15 minutos	50 - 60 minutos
15 - 20 minutos	60 - 90 minutos
20 - 25 minutos	90 - 120 minutos
25 - 30 minutos	Más de 120 minutos

0 5 10 20 Kilometers



(Página anterior)

FIGURA 5.4. Accesibilidad a Nudos de autovía. Elaboración propia

FIGURA 5.5. Accesibilidad a núcleos urbanos o contiguidad. Elaboración propia.

(Arriba)

FIGURA 5.6. Superficies urbanas y suelo urbanizable. Elaboración propia a partir de planeamiento municipal.

se genera un buffer de 100 metros a la línea de costa.

- L5. Áreas ya urbanizadas (Figura 5.11). Se considera la superficie urbana consolidada existente en el año 2004.

5.4.3.4. Generación de la información cartográfica o factores de localización

Cada una de las capas que representan los 5 factores considerados y la que agrupa a los limitantes, son convertidas a formato raster con resolución 10 metros. Una vez transformados los factores son tratados convenientemente para sustraer los píxeles incluidos en la capa de limitantes. Tras este proceso se procede a su normalización por reclasificación y a la valoración de cada una de las categorías.

Normalización y valoración de las categorías de los criterios.

Las puntuaciones en los atributos son normalizadas a efectos de eliminar problemas de cálculo originados por las diferentes escalas y/o unidades empleadas en la matriz de decisión. La normalización no siempre es necesaria, pero si es esencial en la mayoría de los métodos compensatorios. El propósito es el de obtener escalas comparables, lo que permitirá realizar comparaciones intra-atributos así como inter-atributos. En consecuencia, las puntuaciones normalizadas no tienen unidades de dimensión y, para el caso de atributos de beneficios, cuanto mayor sea la puntuación normalizada, mayor es la preferencia del mismo. Una de las opciones, la más utilizada, es el ajuste lineal, mediante el que se reescalan los valores originales entre unos límites mínimo y máximo o los basados en funciones de pertenencia a un conjunto borroso, sin embargo, debido a la naturaleza (escala nominal) de algunos de los factores considerados y con objeto de no perder el control de las magnitudes, se decidió finalmente clasificar y valorar previamente cada factor.

Este paso conlleva un proceso de disminución de la ambigüedad y de la dificultad de manejo de las variables, ya que por lo general se procede a transformar los datos de una escala nominal a una ordinal. Para este estudio se toma un método de asignación de fácil implementación denominado “escala de siete puntos” donde a cada criterio se le asigna un valor de una escala de siete,

siendo 1 el menos apto y 7 el de mayor aptitud (Gómez y Barredo, 2005).

Cabe resaltar para su correcto entendimiento, como para el factor Usos, se asume, con un mayor peso en la valoración, el completo desarrollo del suelo clasificado como urbanizable en las primeras etapas de la modelización, dejando de ser prioritario en etapas posteriores.

Las tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 reflejan esta valoración, que fue consensuada por miembros del Laboratorio de Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Granada, entre los que se encuentran ingenieros de caminos, urbanistas, arquitectos, licenciados en ciencias ambientales y geógrafos.

5.4.3.5. Integración de la información en un S.I.G. y obtención del modelo

El AHP ordena estos factores en un modelo jerárquico, realiza comparaciones binarias (por pares) y atribuye valores numéricos a los juicios (preferencias) realizados por las personas (respecto de la importancia relativa de cada elemento) y los sintetiza, agregando las soluciones parciales en una única solución. (Marioni 2004)

La aplicación de la extensión AHP 1.0 para ArcGis 9 facilita, por tanto, la asignación de pesos o ponderaciones para cada factor. Como resultado se obtienen diferentes niveles de urbanización potencial, que son cuantificados en porcentaje de superficie ocupada respecto al término municipal en cada nivel de potencialidad.

Los pesos generados en la aproximación definitiva fueron 0.4712, 0.2932, 0.04, 0.0775 y 0.1181 para los factores: accesibilidad a nudos, accesibilidad a entornos urbanos, usos, orientación y fruición visual respectivamente, y el ratio de consistencia (que debe ser menor a 0,1) toma el valor 0.0639.

La posterior integración de los factores se realiza mediante una combinación lineal ponderada, quizás el método más intuitivo y fácil de implementar, obteniéndose el valor de aptitud como resultado de la sumatoria, para cada píxel, del producto de cada factor por su peso. Adicionalmente permite realizar el análisis de sensibilidad para observar y estudiar otras posibles soluciones al hacer cambios en la importancia de los elementos que

conforman el modelo.

En la Figura 5.9 se muestra el modelo cartográfico generado con la extensión Model Builder de ArcGIS 9.

5.4.4. Análisis de la dinámica poblacional

El crecimiento de una población se debe a un número de factores que pueden covariar, tales como natalidad y mortalidad, inmigración y emigración, pero además los tamaños de las poblaciones pueden cambiar en función de variables ambientales, espaciales o factores intrínsecos de la población misma. Por ese motivo, se realizan previsiones de población para cada uno de los municipios estudiados (Figura 5.10) basadas en tasas históricas incorporando al modelo variables territoriales y espaciales que serán recogidas en un coeficiente de aptitud a la ocupación, y en un límite de capacidad de carga o población máxima. Se pretende estimar de esta forma la población “de censo” de cada uno de los municipios para los años 2010, 2025 y 2050.

Las proyecciones de población basadas en tasas históricas suponen que si un territorio ha crecido a una cierta tasa durante los últimos años, en los próximos lo seguirá haciendo a la misma tasa, o a otra deducible de ésta. Los cálculos se realizan a partir de las series históricas de población, con crecimientos basados en los periodos 1991-2001 y 2001-2004.

Se han utilizado tres patrones de crecimiento que pueden ser englobados en dos grupos: modelos de crecimiento exponencial y modelos de crecimiento logístico. Un modelo de crecimiento exponencial es un modelo simple, en el cual el tamaño de la población es función de la tasa de crecimiento intrínseca, del tamaño inicial de la población y del tiempo. De este tipo se ha utilizado un modelo de crecimiento interanual y un modelo de crecimiento continuo. El modelo de crecimiento logístico incorpora una variable de presión ambiental, denominada capacidad de carga poblacional, que representa el máximo número de individuos que la superficie limitada del territorio puede acoger.

Crecimiento interanual

Dadas las poblaciones $P(t)$ y $P(t+n)$ en los momentos t y $t+n$ respectivamente se considera que las variaciones

que se producen en cada año repercuten en las cifras del año siguiente.

Se define la tasa de crecimiento interanual como:

$$ci = 1 - ((P(t+n)/P(t))^{1/n})$$

y de este modo

$$P(t+n) = P(t) * (1+ci)^n$$

Crecimiento continuo

Dadas las poblaciones $P(t)$ y $P(t+n)$ en los momentos t y $t+n$ respectivamente equivale al límite con el modelo de crecimiento interanual cuando el periodo en el que se consideran las variaciones se hace muy pequeño y, consecuentemente T tiende a infinito.

Se define la tasa de crecimiento continuo como:

$$tc = (\ln(P(t+n)/P(t)))/n$$

y de este modo

$$P(t+n) = P(t) * \exp(tc * n)$$

Crecimiento logístico

Este modelo incorpora una variable ambiental, denominada capacidad de carga poblacional, que representa el máximo número de individuos que puede sostener el ambiente y que llamaremos P_{max} . La incorporación de esta variable indica que los recursos son limitados para los individuos de la población. De igual modo que el modelo exponencial, este modelo también supone que las respuestas de natalidad y mortalidad son instantáneas. Dadas las poblaciones $P(t)$ y $P(t+n)$ en los momentos t y $t+n$ respectivamente, se define la tasa intrínseca de crecimiento logístico como:

$$r = \{ [((P_{max} - P(t+n)) / (P_{max} - P(t))) * (P(t) / P(t+n))]^{-1/n} - 1 \}$$

y de este modo

$$P(t+n) = P_{max} / (1 + ((P_{max}/P(t)) - 1) * (1+r)^{-n})$$

Los resultados que se obtienen para cada municipio y año provienen de la combinación de todas las hipótesis planteadas hasta ahora, tanto a nivel modélico, como a nivel de datos de partida para las proyecciones. De este modo se obtendrán las siguientes series independientes:

Crecimiento Interanual con y sin Coeficiente de Aptitud con crecimiento de origen similar al periodo 1991-2001.

Crecimiento Interanual con y sin Coeficiente de Aptitud con crecimiento de origen similar al periodo 2001-2004.

Crecimiento Continuo con y sin Coeficiente de Aptitud con crecimiento de origen similar al periodo 1991-2001.

Crecimiento Continuo con y sin Coeficiente de Aptitud con crecimiento de origen similar al periodo 2001-2004.

Crecimiento Logístico con y sin Coeficiente de Aptitud con crecimiento de origen similar al periodo 1991-2001.

Crecimiento Logístico con y sin Coeficiente de Aptitud con crecimiento de origen similar al periodo 2001-2004.

5.4.5. Incorporación de variables espaciales: Capacidad de carga poblacional y coeficiente de aptitud a la urbanización.

Se pretende considerar las posibles discontinuidades en las tendencias que las nuevas infraestructuras van a generar, incorporando a los patrones de crecimiento poblacional la capacidad de carga poblacional de cada municipio y una variable espacial, que llamaremos coeficiente de aptitud a la urbanización, y que introduce la componente territorial sobre esta modelización.

Ambas variables proceden del modelo de aptitud, y se implementan mediante dos índices, el primero, que genera una línea asintótica en el modelo, se construye a partir de la superficie libre del municipio, una vez eliminados los limitantes y transformando a población la superficie apta para urbanizar, tomando densidades medias de 50 y 30 viviendas/ha (según tipología) y una ocupación tipo de 3 hab./vivienda; el segundo surge como cociente entre la superficie calificada como de muy alta aptitud y la superficie o soporte territorial disponible.

Este coeficiente de aptitud es distribuido porcentualmente (30%, 50% y 20%) en varios periodos (2004-2010, 2010-2025 y 2025-2050), considerando la finalización de estas infraestructuras en 2010, para así estimar el incremento poblacional que se generará con las nuevas condiciones de accesibilidad.

Tras un minucioso estudio de los valores generados por cada serie, de la comparación con la evolución de la Costa del Sol Occidental (según los datos absolutos de la po-

blación, realizando un incremento relativo intercensal, se llega a la conclusión de que cada año la población aumenta alrededor de un 4,68% (Diputación de Málaga, 2002)) y del conocimiento propio de la zona, se elige una cuña de valores de población para cada año horizonte, tomando como valores máximo y mínimo el estimado por el modelo logístico con coeficiente de aptitud y con crecimientos en origen igual a la tasa de los periodos 1991-2001 y 2001-2004. La elección de este modelo se justifica por la incorporación de las variables espacial y ambiental, creando un escenario más realista, debido a la consideración de la disminución progresiva en el tiempo de la tasa intrínseca de crecimiento, conforme la población se acerca a su límite de capacidad de carga, y del aumento de la población inducido por la aptitud del territorio a acoger nuevas actividades y población.

Este análisis permite a su vez retroalimentar el modelo predictivo mediante la estimación de la superficie urbana demandada para cada uno de los años horizonte.

5.4.6. Resultados

Los resultados del análisis prospectivo de población para cada uno de los 50 municipios se reflejan en la tabla 5.7. Tras este análisis de la dinámica poblacional se procede a la transformación: población estimada-superficie urbana demandada, mediante la asignación de los estándares de densidad indicados. El resultado es un valor de superficie urbana demandada para cada año horizonte y para cada ámbito municipal. (tabla 5.7)

En cuanto al modelo generado mediante técnicas compensatorias aditivas, combinación lineal ponderada y jerarquías analíticas, tras su correspondiente validación y análisis de sensibilidad, y una vez implementada la demanda de superficie urbana para cada uno de los años horizonte, se reclasifica adecuadamente, actuando individualmente para cada municipio y tomando como umbrales dichas superficies, obteniéndose finalmente la localización espacial y temporal de las zonas de mejor aptitud hacia la urbanización para cada uno de los municipios considerados.

En la figura 5.12 se muestran los posibles escenarios de aptitud al desarrollo urbano para los años 2010, 2025 y 2050 en los que se pueden apreciar unas secuencias moderadas del crecimiento urbanístico espacial estimado,

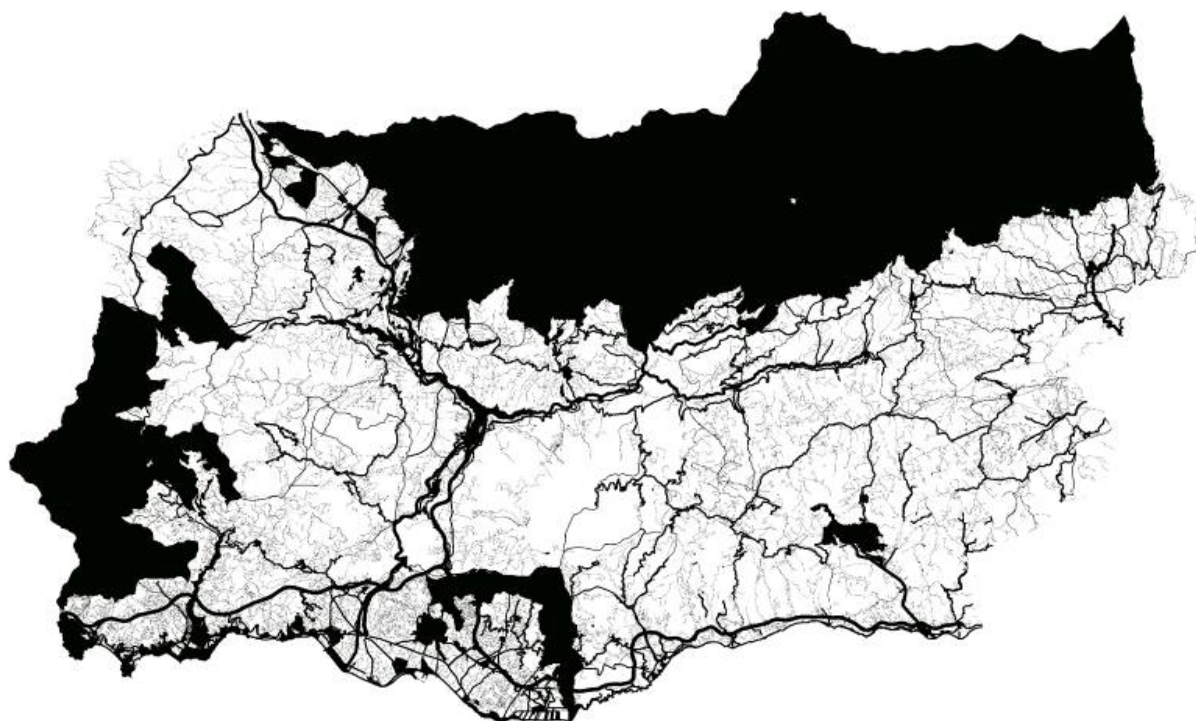
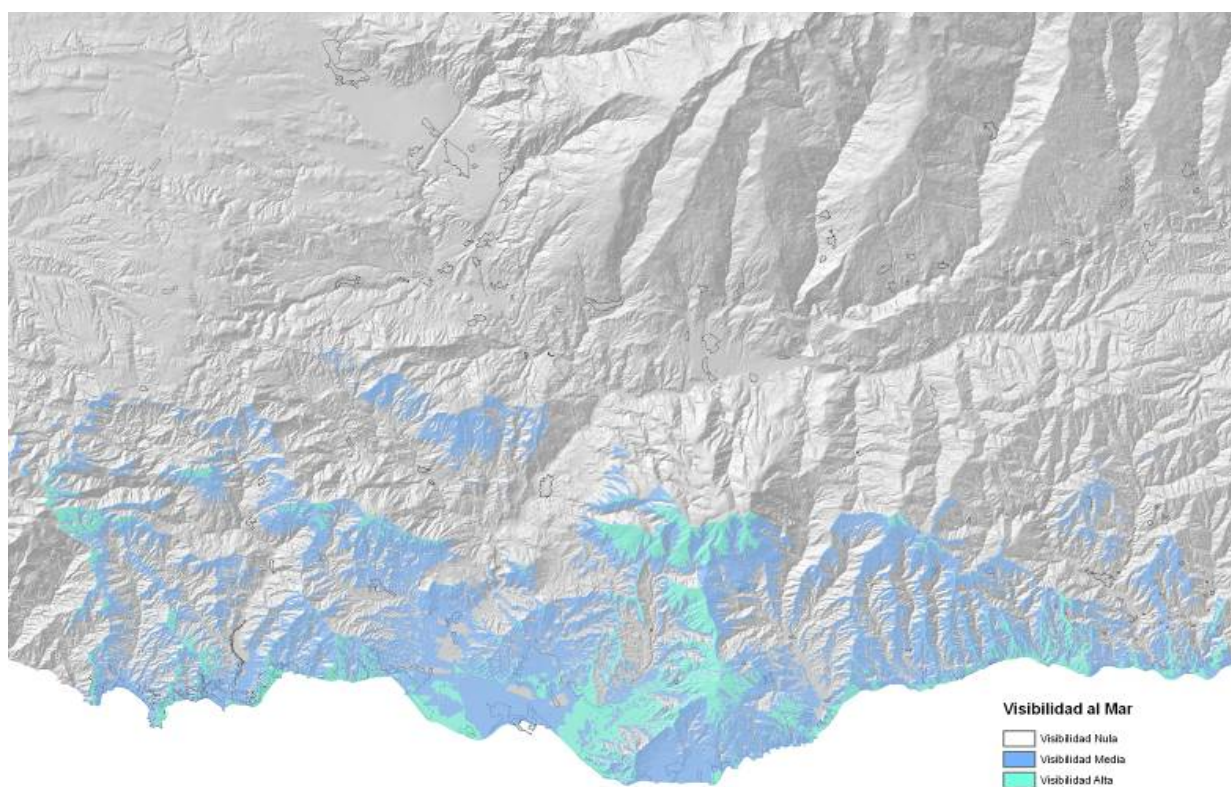


FIGURA 5.7. Fruición visual o amplitud visual al mar. Elaboración propia.

FIGURA 5.8. Criterios limitantes o restricciones. Elaboración propia.

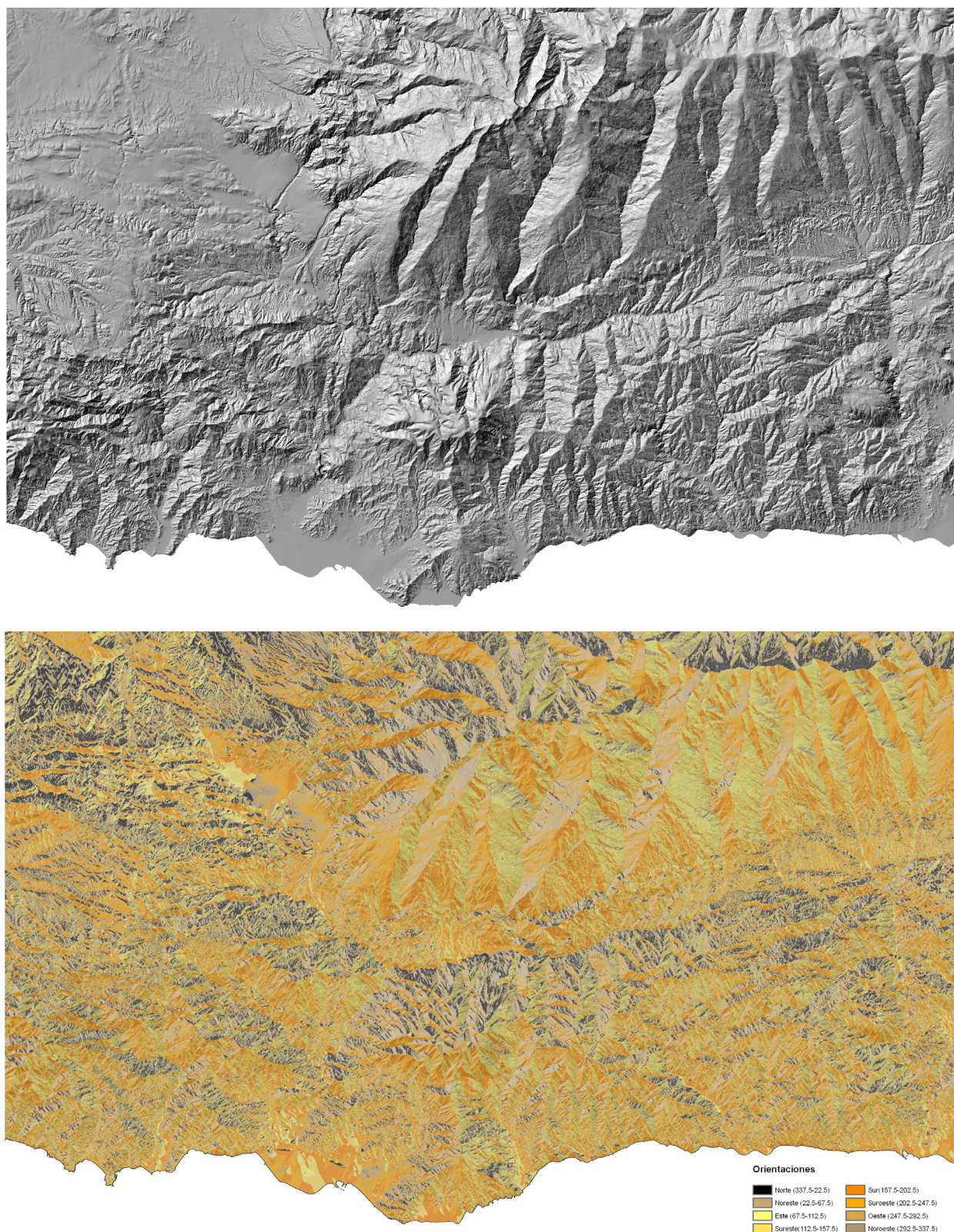


FIGURA 5.9. Modelo digital de elevaciones y mapa derivado de orientaciones. Elaboración propia.

Tipo de vía	Velocidad (nivel de tráfico fluido)	Tiempo (seg)
Autovía (doble calzada)	110 km/h	0,03
Carretera	70 km/h	0,05
Travesía	30 km/h	0,13
Calle	20 km/h	0,17
Camino	20 km/h	0,17
Senda	10 km/h	0,33
Cortafuego	8 km/h	0,5
Sin viario (acceso a pie)	4 km/h	1

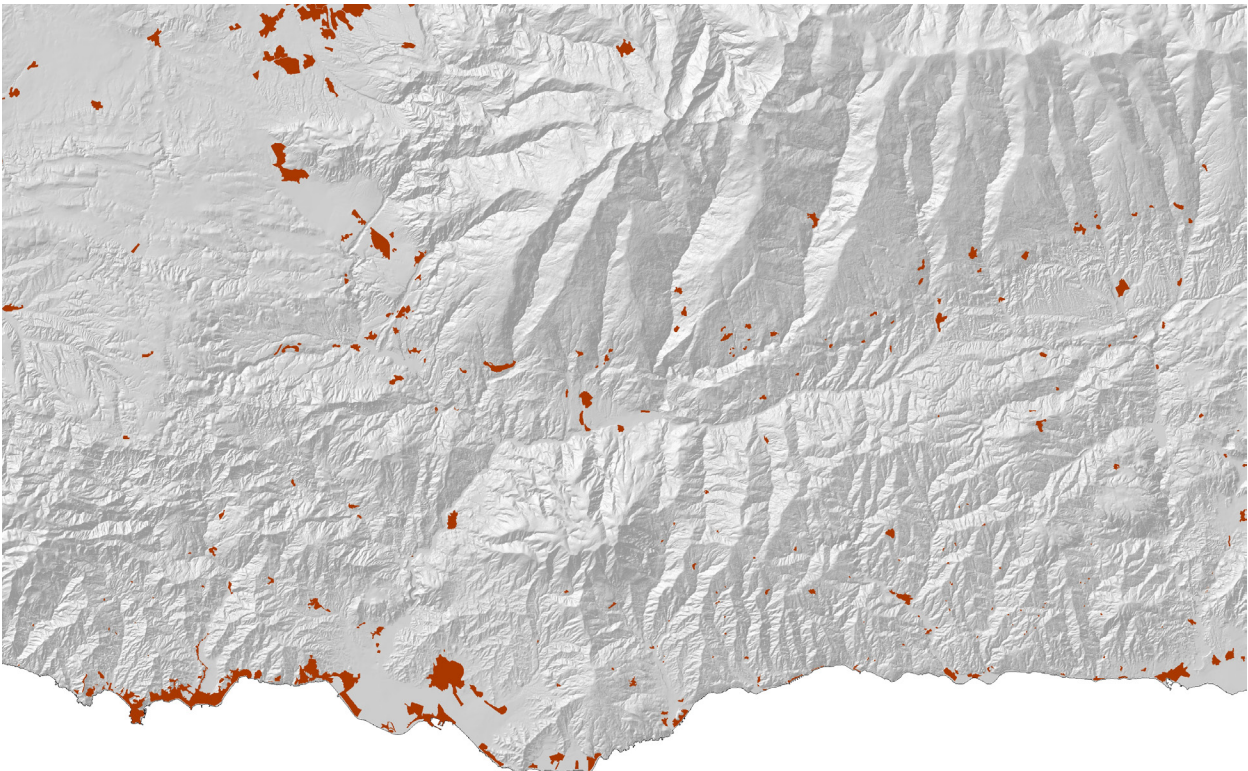
TABLA 5.1. Asignación de velocidades y tiempos para el modelo de accesibilidad. Elaboración propia

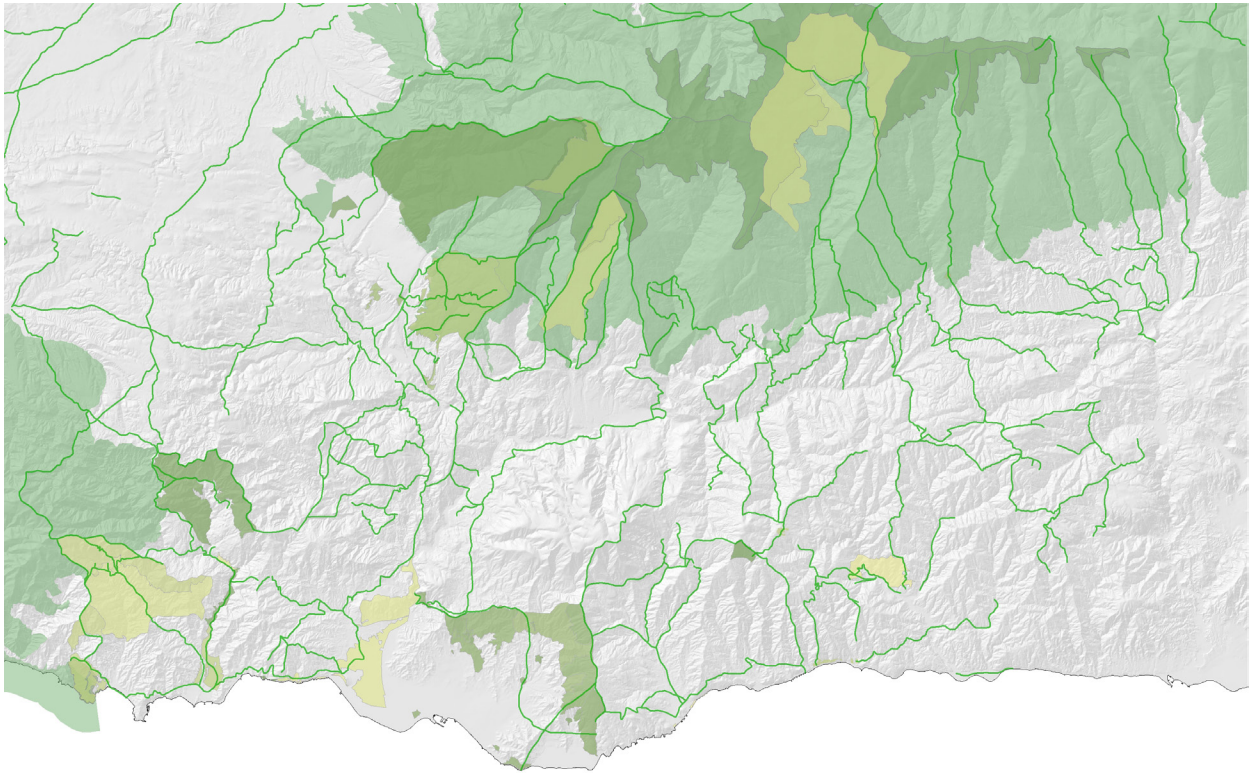
Intervalo original	Valor asignado
0 - 300 seg.	7
300 - 600 seg.	6
600 - 1200 seg.	5
1200 - 1800 seg.	4
1800 - 2700 seg.	3
2700 - 3600 seg.	2
> 3600 seg.	1

TABLA 5.2. Asignación de valores por reclasificación del factor Accesibilidad a Nudos. Elaboración propia

Intervalo original	Valor asignado
0 - 60 seg.	7
60 - 120 seg.	6
120 - 180 seg.	5
180 - 240 seg.	4
240 - 300 seg.	3
300 - 600 seg.	2
< 600 seg.	1

TABLA 5.3. Asignación de valores por reclasificación del factor Accesibilidad a Entornos urbanos. Elaboración propia





(Página anterior)

FIGURA 5.10. Red hidrográfica en la zona de estudio. Elaboración propia

FIGURA 5.11. Superficies urbanizadas según planeamiento municipal. Elaboración propia.

(Arriba)

FIGURA 5.12. Superficies protegidas. Elaboración propia.

Intervalo original	Valor asignado
Urbanizable	7
Improductivo	6
Matorral - pastizal	5
Secano - olivar	4
Regadío	3
Arbolado	2
Invernaderos	1

TABLA 5.4. Asignación de valores por reclasificación del factor Usos. Elaboración propia

Intervalo original	Valor asignado
140° - 220°	7
100° - 140°	6
220° - 260°	5
20° - 100°	4
260° - 340°	3
0° - 20°	2
340° - 360°	1

TABLA 5.5. Asignación de valores por reclasificación del factor Orientación. Elaboración propia

Intervalo original	Valor asignado
140° - 220°	7
100° - 140°	6
220° - 260°	5
20° - 100°	4
260° - 340°	3
0° - 20°	2
340° - 360°	1

TABLA 5.6. Asignación de valores por reclasificación del factor Fruición visual. Elaboración propia

en relación a modelizaciones previamente ensayadas y a ámbitos territoriales contiguos.

5.5. Conclusiones

Cada vez es más reconocido el carácter impredecible, la incertidumbre de las decisiones que guían los procesos de urbanización, en una economía globalizada y liberada del factor físico de la distancia, en la que cualquier actividad se puede desarrollar casi en cualquier lugar. Una perspectiva más amplia será la de usar las medidas de accesibilidad para integrar las políticas de usos del suelo y de transporte en un ámbito determinado. Los análisis cuantitativos de accesibilidad y su impacto sobre los cambios en los usos del suelo parecen tener, a la vista de los resultados, un potencial relevante como instrumento en la planificación.

El análisis de la dinámica poblacional muestra que la trayectoria experimentada por la población en la red de asentamientos manifiesta, en definitiva, dos tendencias divergentes en la evolución del poblamiento: de un lado la marcada vitalidad del litoral y su área de influencia, ligada a su mayor dinamismo social y económico; de otro lado, se evidencia el declive rural de las áreas de interior.

El modelo ensayado, que a nivel territorial se vislumbra como posible, necesita de un proceso de validación para ajustarse de forma más apropiada a las expectativas municipales. El análisis de sensibilidad y los mismos resultados parciales de cada factor se convierten ahora en potenciales escenarios a ser analizados.

El desarrollo de los S.I.G. raster, y sus funciones de análisis espacio-temporal a través de series cronológicas de usos del suelo, así como su puesta en relación con un conjunto de variables explicativas mediante evaluación multicriterio, permite, en un ejercicio de modelización prospectiva, establecer posibles escenarios de ocupación (Paegelow et al, 2003).

Como es palpable en esta experiencia, la combinación de la información territorial georreferenciada junto con la posibilidad de aplicar algoritmos de accesibilidad a la

red de transporte, integrados en un único modelo, logra aunar los principios de la modelización basada en actividades con la de la localización de usos y la movilidad, de forma consistente.

Sin embargo la principal novedad de esta aplicación está en la retroalimentación mutua entre análisis estadísticos demográficos y su traducción espacial, y el establecimiento de la superficie potencial de crecimiento urbano en distintos horizontes temporales usando AHP.

En este sentido, es necesario determinar la vigencia de los resultados del AHP, pues seguramente en un plazo que debe preverse, se tendrían que incorporar nuevos aspectos relevantes a tener en cuenta, debido a las condiciones cambiantes del macro y microentorno de la situación en cuestión (cambios en los entornos biofísico, social, económico, político y tecnológico).

La modelización desarrollada en este trabajo, la información generada y su sugerente representación gráfica, permiten una aproximación consistente a la incertidumbre intrínseca de los horizontes futuros a establecer y necesarios para la implementación de modelos de planificación integrada y ayuda a los planificadores, tomadores de decisión u otros actores, a profundizar en su conocimiento de la realidad del territorio, a analizar y emprender acciones, teniendo en cuenta las necesidades e intereses de la comunidad y la visión que tienen de su propio futuro en lo concerniente a los usos del suelo, incluidas las amenazas y oportunidades a las que conllevaría cada posible solución.



FIGURA 5.12. Escenarios de aptitud al desarrollo urbano para los años 2010, 2025 y 2050. Elaboración propia.

MUNICIPIO	Poblacion total (padron 2004)	Poblacion estimada máxima (2010)	Crecimiento Periodo 2004-2010	Superficie de Suelo Urbano demandado en 2010 (Has)	Poblacion estimada máxima (2025)	Crecimiento Periodo 2004-2025	Superficie de Suelo Urbano demandado en 2025 (Has)	Poblacion estimada máxima (2050)	Crecimiento Periodo 2004-2050	Superficie de Suelo Urbano demandado en 2050 (Has)
ALBONDON	941	796	-145	0	522	-419	0	258	-683	0
ALBUNOL	6.054	6.853	799	10	9.846	3.792	47	18.249	12.195	152
ALBUÑUELAS	1.100	1.013	-87	0	825	-275	0	586	-514	0
ALMEGIJAR	445	589	144	2	1.178	733	9	3.667	3.222	40
ALMUNECAR	23.073	27.095	4.022	50	40.734	17.661	221	74.501	51.428	643
ALPUJARRA DE LA SIERRA	1.175	1.221	46	1	1.341	166	2	1.568	393	5
BERCHULES	788	861	73	1	1.067	279	3	1.504	716	9
BUBION	347	383	36	0	481	134	2	678	331	4
BUSQUISTAR	352	315	-37	0	235	-117	0	142	-210	0
CADIAR	1.567	1.402	-165	0	1.060	-507	0	664	-903	0
CANAR	339	390	51	1	549	210	3	937	598	7
CAPILEIRA	578	622	44	1	738	160	2	950	372	5
CARATAUNAS	204	228	24	0	301	97	1	473	269	3
CASTARAS	249	223	-26	0	170	-79	0	107	-142	0
DURCAL	6.151	6.512	361	5	7.656	1.505	19	9.984	3.833	48
GUAJARES, LOS	1.203	1.080	-123	0	825	-378	0	526	-677	0
GUALCHOS	2.621	2.667	46	1	3.095	474	6	4.137	1.516	19
ITRABO	1.031	1.096	65	1	1.307	276	3	1.767	736	9
JETE	768	839	71	1	1.044	276	3	1.502	734	9
JUVILES	178	196	18	0	246	68	1	358	180	2
LANJARON	3.757	3.869	112	1	4.173	416	5	4.735	978	12
LECRIN	2.269	2.335	66	1	2.620	351	4	3.225	956	12
LENTEJI	330	317	-13	0	285	-45	0	240	-90	0
LOBRAS	132	118	-14	0	89	-43	0	55	-77	0
LUJAR	506	516	10	0	579	73	1	721	215	3
MOLVIZAR	2.745	3.446	701	9	7.427	4.682	59	26.705	23.960	300
MOTRIL	56.049	73.821	17.772	222	161.370	105.321	1.317	363.292	307.243	3.841
MURTAS	713	690	-23	0	635	-78	0	552	-161	0
NEVADA	1.228	1.145	-83	0	960	-268	0	714	-514	0
NIGUELAS	955	950	-5	0	966	11	0	1.008	53	1
ORGIVA	5.175	5.836	661	8	7.870	2.695	34	12.893	7.718	96
OTIVAR	1.056	1.013	-43	0	911	-145	0	764	-292	0
PADUL	7.217	8.362	1.145	14	12.945	5.728	72	26.777	19.560	245
PAMPANEIRA	327	399	72	1	625	298	4	1.085	758	9
PINAR, EL	1.119	1.198	79	1	1.446	327	4	1.993	874	11
POLOPOS	1.493	1.869	376	5	3.460	1.967	25	9.685	8.192	102
PORTUGOS	415	401	-14	0	367	-48	0	316	-99	0
RUBITE	492	623	131	2	1.141	649	8	3.135	2.643	33
SALOBRENA	11.420	16.840	5.420	68	56.008	44.588	557	173.682	162.262	2.028
SOPORTUJAR	269	314	45	1	460	191	2	857	588	7
SORVILAN	694	694	0	0	700	6	0	712	18	0
TAHA, LA	793	818	25	0	883	90	1	1.002	209	3
TORVIZCON	807	692	-115	0	469	-338	0	246	-561	0
TREVELEZ	827	936	109	1	1.221	394	5	1.666	839	10
TURON	335	352	17	0	397	62	1	486	151	2
UGIJAR	2.541	2.352	-189	0	1.936	-605	0	1.399	-1.142	0
VALOR	768	662	-106	0	455	-313	0	243	-525	0
VALLE, EL	1.151	1.116	-35	0	1.080	-71	0	1.043	-108	0
VELEZ DE BENAUDALLA	2.575	2.677	102	1	2.969	394	5	3.536	961	12
VILLAMENA	988	1.160	172	2	2.097	1.109	14	5.889	4.901	61
TOTAL	158.310	189.902	31.592	408	349.764	191.454	2.440	771.214	612.904	7.745

TABLA 5.7. Tabla resumen de población y superficie de suelo demandado.

CAPITULO 6

Modelos geomáticos para la simulación prospectiva de dinámicas territoriales.....227

6.1. Introducción

6.2. Modelos geomáticos para la simulación de dinámicas territoriales.

6.2.1. Modelos deterministas

6.2.2. Modelos probabilísticos, estocásticos o de Monte Carlo

6.2.2.1. Cadenas de Markov (MCA)

6.2.3. Modelos basados en inteligencia artificial

6.2.3.1. Autómatas celulares

6.2.3.2. Sistemas Multi-Agente

6.2.3.3. Redes neuronales

6.2.4. Lógica difusa

6.2.5. Herramientas para la modelización

6.2.5.1. LCM (Land Change Modeller)

6.2.5.2. Markov

6.2.5.3. CA_Markov

6.2.5.4. Otras herramientas.

6.3. Modelización prospectiva del paisaje y los usos del suelo.

6.4. Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de uso del suelo. Evaluación del potencial de cambio. Comparativa entre CA_Markov y LCM

6.4.1. Ámbito de estudio.

6.4.2. Metodología

6.4.3. Resultados

6.4.4. Discusión y Conclusiones

6.5. Los Gradientes de Accesibilidad Territorial en la simulación del Crecimiento Urbano de la Región de Murcia. Análisis y valoración mediante métricas e índices espaciales

6.5.1. Ámbito de estudio

6.5.1.1. Cartografía de partida y bases de datos

6.5.1.2. Dinámica de los usos del suelo. Zonas urbanas, industriales y de transporte

6.5.2. Objetivos

6.5.3. Metodología

6.5.3.1. Factores y restricciones del crecimiento urbano

6.5.3.2. Simulación del crecimiento urbano

6.5.3.3. Fragilidad eco-paisajística y visual

6.5.4. Resultados

6.5.4.1. Simulación del crecimiento urbano en 2006 y 2020

6.5.4.2. Fragilidad eco-paisajística.

6.6. Discusión y Conclusiones

6 MODELOS GEOMÁTICOS PARA LA SIMULACIÓN PROSPECTIVA DE DINÁMICAS TERRITORIALES.

6.1. introducción

En el capítulo anterior aparecían los términos modelización y simulación, usados normalmente para definir el mismo concepto, y entendidos como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del mismo o evaluar nuevas estrategias para su funcionamiento (Shannon, 1975). Una simulación puede hacerse para un intervalo temporal conocido, con un comienzo y un final determinado (interpolación).

Un paso más en este proceso de acercamiento a los procesos espacio-temporales sería la predicción o simulación prospectiva. Se trata de una extrapolación en el tiempo y el resultado mostraría lo que puede suceder en un momento temporal desconocido, generalmente futuro.

En este capítulo se presenta un ejemplo de la aportación de los gradientes de accesibilidad expuestos en el capítulo 3 en la simulación del crecimiento del suelo urbano y de los de exposición visual en la valoración de la fragilidad paisajística. Previamente se realiza una revisión de los modelos geomáticos utilizados y una comparativa entre dos de las herramientas más utilizadas en la compleja tarea de la simulación prospectiva.

6.2. Modelos geomáticos para la simulación de dinámicas territoriales.

En palabras de Henry (1997) “un modelo es una interpretación abstracta, simplificada e idealizada de un objeto del mundo real, de un sistema de relaciones o de un proceso evolutivo que surge de una descripción de la realidad”. La aplicación de modelos es común en todas las disciplinas y tiene por tanto también una importante función en el estudio del territorio, como sistema complejo. En este campo, el modelo adquiere un carácter espacial y temporal de suma importancia a la hora de entender los cambios producidos en una zona concreta

(Pérez et al. 2004).

La geocomputación o geomática, término que aparece por primera vez en Quebec, en la Université Laval (la primera universidad de lengua francesa en América) durante los años 80, hace referencia a todas las formas de tratamiento de los datos espaciales situándose a medio camino entre la geografía y las ciencias de la computación. Integra las técnicas de los Sistemas de Información Geográfica, de la teledetección y de otras disciplinas que tratan del análisis espacial o territorial, incluyendo, por ejemplo, la geoestadística o el análisis geoespacial. Una completa revisión de los diferentes modelos geomáticos, los avances en simulación y un amplio abanico de ejemplos y aplicaciones prácticas pueden encontrarse en Paegelow et al. (2008). En el ámbito urbano y metropolitano, es muy interesante el recorrido histórico que realiza Aguilera (2008) por el conjunto de modelos de simulación urbana desarrollados a lo largo del siglo XX. Para clasificar los diferentes tipos de modelos geomáticos podríamos referirnos a la revisión cronológica de la literatura existente que hace Briassoulis (2000) o a la variedad tipológica que sugieren Kanevsky et al. (2004), aunque algunos autores, como C. Henríquez (Henríquez et al. 2006), coinciden en la prevalencia de dos aproximaciones, los modelos basados en regresión, y los basados en transiciones espaciales:

- Los primeros establecen relaciones entre un alto rango de variables predictivas y las probabilidades de cambio de uso del suelo. La influencia de estas variables sobre el cambio de uso es tradicionalmente modelada considerando mayor influencia a menor distancia (Theobald et al. 1998 y Weng 2002). Generalmente, en la modelización basada en regresión se han usado aproximaciones lineales, como la regresión logística, no lineales, vinculadas a redes neuronales, y modelos aditivos generalizados (Pijanowski et al. 2005). El objetivo de estos modelos es establecer relaciones funcionales entre un

conjunto de variables debidamente espacializadas que, posteriormente, son usadas para estimar la localización de los cambios sobre el paisaje. El valor de los modelos de regresión es la fácil obtención de la contribución relativa de diferentes variables, que permiten pronosticar un determinado cambio de uso del suelo. Debido a la naturaleza espacial de muchas de las variables de entrada, la integración con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es esencial ya que permite un manejo y análisis espacialmente explícito de los datos asociado al modelo (Qi et al. 1996 y De Koning et al. 1999). En este sentido, los SIG suponen un gran aporte en la construcción de las variables de entrada para la modelación, en la identificación de patrones espaciales en los datos, en la cuantificación de los cambios temporales observados o predichos, en la evaluación de factores que operan cruzando una variedad de escalas, y finalmente en la visualización de los resultados mediante representaciones cartográficas. En White et al. (1997) se pueden encontrar interesantes resultados de la aplicación de estos modelos.

- Los modelos basados en transiciones espaciales comprenden, principalmente, las técnicas estocásticas basadas en el método de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (AC) (Zhou et al., 1995 y Pontius et al., 2005). Estos modelos asumen explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central. Los AC incorporan reglas simples acerca de los efectos de adyacencia espacial que gobiernan la dinámica del sistema y que dan lugar a patrones de comportamientos emergentes que son usualmente más complejos que aquellos generados por simples modelos de equilibrio (Henríquez, 2007).

Para una correcta clasificación de estos modelos, es sin embargo más generalizada la distinción entre modelos deterministas, estocásticos y los basados en inteligencia artificial. A continuación se explican cada uno de ellos por separado, haciendo notar que en la práctica es habitual la utilización combinada de dos o más modelos en una misma simulación. Además se incluyen otros modelos como los basados en la lógica difusa y en la dinámica de sistemas por su actualidad y aplicabilidad.

6.2.1. Modelos deterministas

Estos modelos, también llamados en ocasiones analíticos o mecánicos, se basan en la utilización de un algoritmo matemático. Describen completamente el proceso modelizado sin dejar nada a la probabilidad. Su rigurosidad matemática facilita la implementación del modelo pero también limita su ámbito de aplicación, generalmente restringido a altos niveles de abstracción del sistema. La principal limitación de estos modelos en la modelización de dinámicas medioambientales es su pobre grado de espacialización y desconocimiento de los datos. Generalmente estos modelos consideran el espacio como homogéneo, hipótesis que raramente coincide con la realidad (Paegelow et al. 2008).

6.2.2. Modelos probabilísticos, estocásticos o de Monte Carlo

En un proceso estocástico el estado varía de una forma aleatoria. La idea básica es que el estado futuro se encuentra entre unos estados posibles, conocidos y finitos. La aplicación de estos modelos, entre los que se encuentran las conocidas Cadenas de Markov, es numerosísima desde los años 50 (Metropolis et al. 1949) y se basa en el insuficiente conocimiento de los elementos del sistema que pueden ser aproximados mediante probabilidad.

6.2.2.1. Cadenas de Markov (Markov chain analysis o MCA)

Reciben su nombre del matemático ruso Andrei Andreevitch Markov (1856-1922), que las introdujo en 1907 y es, hoy en día, uno de los enfoques estocásticos más utilizados en ecología y modelización medioambiental. Ejemplo de ello es el enorme número de publicaciones sobre cambios en el uso y cobertura del suelo (Land use/cover changes) o LUCC donde se realizan análisis mediante cadenas markovianas.

En la teoría de la probabilidad se conoce como propiedad markoviana a un proceso estocástico discreto en el que la probabilidad de que ocurra un evento o se de un estado del sistema (probabilidad de transición) depende únicamente del evento o del estado del sistema inmediatamente anterior. Muchos procesos reales pueden modelizarse examinando únicamente su historia reciente, su

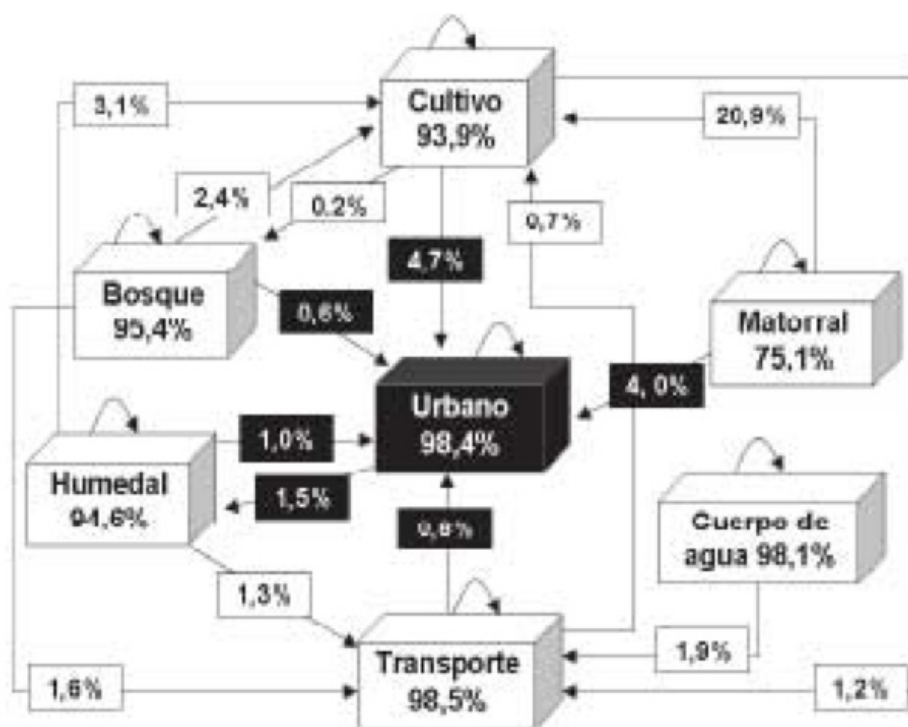
último estado. Los acontecimientos se modelizan como pasos o transiciones de unos estados a otros que se producen en periodos uniformes de tiempo.

El funcionamiento de este modelo de análisis es fácilmente explicable mediante el ejemplo desarrollado por Coquillard et al. (1997): la evolución temporal de una población. Los individuos pueden encontrarse en cuatro diferentes estados, juventud (J), madurez (M), vejez (S) o muertos (D). La figura 6.1 proporciona una idea de estos estados (nodos) y sus transiciones posibles representadas como probabilidad (arcos). El paso de un estado a otro vendría dado por la matriz de transición que refleja la probabilidad de cada uno de esos posibles cambios y que dependen del estado anterior.

6.2.3. Modelos basados en inteligencia artificial

Aunque la literatura da diferentes definiciones para la Inteligencia artificial (AI), aquí se toma de forma simplificada la que se refiere a estos modelos como los programas informáticos que simulan el proceso cerebral humano u otros mecanismos complejos. Se basan en los conceptos de conocimiento previo y de auto aprendizaje. Así, la mejora del conocimiento puede ser añadida (de origen externo), y es el caso de los autómatas celulares, los sistemas expertos y los sistemas multi-agente, o autoaprendida, como en el caso de las redes neuronales. Como ejemplo de estos modelos destacan por sus aplicaciones a la modelización de dinámicas territoriales y medioambientales, los basados en autómatas celulares, en sistemas multiagente y en redes neuronales:

FIGURA 6.1. Transiciones representadas como probabilidad de cambio en el Modelo de cadenas de Markov.



Para la modelización y explicación de los patrones espaciales de crecimiento urbano, por ejemplo, se emplearían las cadenas marcovianas para establecer las secuencias temporales y probabilidades de sucesión de los usos y coberturas del suelo a partir de los cambios observados en espacios de tiempo anteriores.

6.2.3.1. Autómatas celulares (Cellular automata, CA).

El desarrollo de los autómatas celulares se construye sobre los trabajos de Ulam y Von Neumann (Von Neumann, 1966), allá por los años 40, Burks (1970) y Gardner (1970), si bien la idea del autómata celular pertenece al londinense A. Turing y su máquina universal, como

principio básico de la teoría de la computación, ideada en 1936.

Un modelo basado en autómatas celulares es entendido como un mecanismo de proceso, formado por un conjunto de elementos sencillos e idénticos entre sí, llamados células, celdas, píxeles o teselas, que contienen cada uno un autómata, cuyas características cambian en el tiempo en función de sus propias características, de un conjunto de reglas de transición y de un input externo (vecindad).

Un ejemplo ilustrativo para explicar este funcionamiento se puede encontrar en el conocido Game of Life del matemático inglés John Conway (Gardner, 1970). La modelización del nacimiento, la muerte y la supervivencia de una colonia de células se realizaba representándolas sobre una retícula donde para cada celda o autómata solo eran posibles dos estados (viva o muerta). Partiendo de unas condiciones aleatorias, se establece un tipo de vecindad (de Moore si se toman las ocho celdas adyacentes o de Von Neumann si únicamente se consideran las cuatro más cercanas) y unas reglas de transición: Si una célula está viva, muere por aislamiento si a su alrededor hay menos de dos células vivas, sobrevive si hay de dos a cuatro, o muere por superpoblación si hay más de cuatro, y si una célula está muerta, nacerá al tener tres células vecinas.

Cada etapa en la evolución de la colonia, en intervalos de tiempo discretos, supone una iteración donde se aplican las reglas de transición y se obtiene un nuevo estado. Así, el modelo es capaz de generar patrones de gran complejidad a partir de una situación inicial y un conjunto de reglas sencillas.

Las aplicaciones de los autómatas celulares en el campo de la planificación territorial y medioambiental son muy numerosas pero es en el ámbito urbano y metropolitano donde este modelo genera mejores aproximaciones. Una revisión de estas aplicaciones a las dinámicas urbanas se puede encontrar en Langlois et al. (1997) y actualizaciones en Batty et al. (1999), Yeh et al. (2001) y Aguilera (2008).

Las ventajas y limitaciones de la aplicación de este modelo a son también ampliamente tratados en publicaciones como White et al. (2000), Benenson et al. (2006) y

Aguilera (2008).

6.2.3.2. Sistemas Multi-Agente (MAS).

Este modelo basado en agentes, también llamado de inteligencia artificial distribuida, puede ser descrito como una extensión sofisticada de los autómatas celulares en los que es posible la incorporación al modelo de la influencia de la toma de decisiones humanas (entidades o colectivos) y sus interacciones. Estos componentes autónomos llamados agentes están organizados de acuerdo a unas reglas de comportamiento o roles sociales que son susceptibles de ser modelizadas de forma semejante al automatismo celular explicado con anterioridad. Su rasgo distintivo es la interacción, que ocurre cuando dos o más agentes se involucran en una relación dinámica a través de un conjunto de acciones recíprocas (Ferber, 1999).

Una revisión de las aplicaciones de este modelo a la simulación de cambios en los usos del suelo y a planificación territorial la podemos encontrar en Parker et al. (2003) y más recientemente en Matthews et al. (2007) y en Paegelow et al. (2008).

6.2.3.3. Redes neuronales (Neural networks, NN).

Basados en la eficiencia de los procesos llevados a cabo por el cerebro humano, e inspirados en su funcionamiento, se ha desarrollado desde hace más de 60 años la teoría de las Redes Neuronales Artificiales que emulan el comportamiento de las redes neuronales biológicas y se vienen utilizando para aprender estrategias de solución basadas en ejemplos de comportamiento típico de patrones. Apartando los aspectos matemáticos y telemáticos que sobrepasan la temática de este capítulo, lo interesante de esta técnica es su capacidad de aprendizaje y de generación de información que no se ha introducido de forma explícita. Estos sistemas no requieren que la tarea a ejecutar se programe, una vez entrenados, ellos generalizan y aprenden de la experiencia.

Una red neuronal se compone de unidades llamadas neuronas. Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Se trata de datos espacio-temporales a los que hay que añadir variables explicativas suplementarias. Esta salida viene dada por tres funciones:

- Una función de propagación o de excitación, que por lo general consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión (valor neto). Si el peso es positivo, la conexión se denomina excitatoria; si es negativo, se denomina inhibitoria.

- Una función de activación, que modifica a la anterior. Puede no existir, siendo la salida la misma función de propagación.

- Una función de transferencia, que se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acotar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que queramos darle a dichas salidas.

El perceptrón es el sistema neuronal más simple que solo es capaz de de solucionar problemas lineales separables (una capa de entrada y una de salida) que, obviamente, resultan ser un caso muy particular de de los problemas reales. Para solucionar esto se recurre al perceptrón multicapa (Multilayer perceptron, MLP), compuesto por una capa de entrada, constituida por las neuronas que constituyen los patrones de entrada en la red, una o varias capas ocultas o intermedias donde se produce el procesamiento, y una capa de salida de la red (Figura 6.2).

La propagación hacia atrás, también conocida como retropropagación del error o regla delta generalizada, es un algoritmo utilizado en el entrenamiento de estas redes, por ello el perceptrón multicapa también es conocido como red de retropropagación.

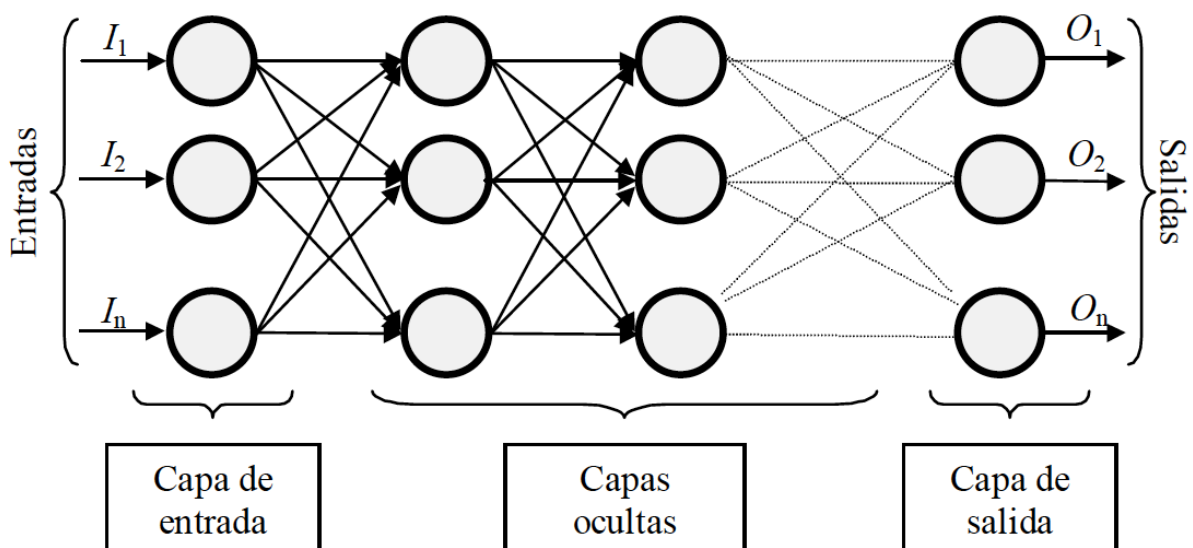
Estos sistemas de inteligencia artificial, aplicados a la simulación prospectiva de dinámicas territoriales, serían capaces de obtener, desde una situación actual y con un adecuado entrenamiento, las reglas de iteración entre los elementos del sistema y de esa manera construir las reglas de transición y los algoritmos para la simulación de escenarios futuros alternativos.

Este modelo (MLP) será utilizado más adelante, en la experiencia práctica, para obtener cartografías de potencial de transición, que es la plasmación espacio-temporal del potencial de cambio.

6.2.4. Lógica difusa (Fuzzy logic)

La hipótesis de que todos los sistemas se pueden reducir a un conjunto exacto de ecuaciones diferenciales ha sido rebatida por la experiencia, que demuestra que los procesos reales complejos nunca se pueden modelar, medir ni controlar de forma exacta. (Rojas et al. 2006).

FIGURA 6.2. Perceptrón muticapa.



Procesos imprecisos, relacionados con la incertidumbre en la localización o el contorno, con posibles errores, con la relatividad de lo observado, o cuando entran en juego definiciones o conocimientos no estrictamente definidos o subjetivos, pueden ser modelizados mediante la denominada lógica difusa, borrosa, o heurística. Su origen está asociado con las investigaciones del profesor de ingeniería electrónica en Berkeley, Lotfi Zadeh (Zadeh, 1965) y actualmente se utiliza para la resolución de una gran variedad de problemas, principalmente relacionados con el control de procesos industriales complejos y sistemas de decisión. Un importante número de investigaciones han sido desarrolladas basándose en sistemas difusos para resolver problemas de geoprocésamiento (Bouchon-Meunier 1995, Dragicevic et al. 2000) o asociados a dinámicas medioambientales (Centeno et al. 2005 y Schultz et al. 2006). En Petry et al. (2005) se puede consultar una completa revisión de los aspectos metodológicos relacionados con la modelización difusa y sus aplicaciones a problemas geográficos o territoriales.

6.2.5. Herramientas para la modelización.

La implementación práctica de estos conceptos sobre modelización y sus aproximaciones metodológicas puede ser realizada de dos diferentes maneras. La primera consiste en usar módulos incluidos en Sistemas de Información Geográfica convencionales, y la segunda utilizar modelos específicos desarrollados con lenguajes de programación, macro lenguajes o programas estadísticos como SPLUS o Matlab. A continuación se describen brevemente las características de las herramientas de modelización incluidas en los SIG más extendidos.

Los productos de ESRI (Environmental Systems Research Institute), como ArcInfo, ArcView y ArcGis incluyen en sus últimas versiones una gran variedad de herramientas de modelización. Es el caso del Land Change Modeller (extensión disponible desde el verano de 2007), desarrollada por Clark Labs primero para su propio software Gis: Idrisi (su última versión se denomina Taiga), con más de 300 módulos para la visualización y el análisis de la información geográfica.

6.2.5.1. LCM (Land Change Modeller).

Es una aplicación diseñada específicamente para el análisis y la predicción de impactos relacionados con los cambios en los usos del suelo y la pérdida de biodiversidad asociada a ellos (Clark Labs, 2006-2010). Integrada dentro de IDRISI, y disponible también como extensión del software ArcGIS de Esri, el LCM incluye una gran variedad de herramientas que permiten abordar las complejidades del análisis de cambios, la gestión de recursos y la evaluación de hábitats, manteniendo en todo momento un flujo de trabajo sencillo y automático (Clark Labs, 2006-2010).

Para modelizar los cambios esperados en un determinado territorio, el LCM utiliza dos mapas de usos del suelo pertenecientes al mismo lugar y referentes a dos períodos de tiempo distintos. En la primera fase, el LCM analiza los cambios acaecidos entre ambos períodos, mientras que en una segunda fase, aplica el modelo que permite realizar la predicción. Con el fin de conseguir un modelo más efectivo, el LCM permite incorporar restricciones e incentivos al cambio. Entre las restricciones se incluyen áreas protegidas o reservas forestales, lugares que a pesar de ser susceptibles al cambio, éste queda descartado. Por el contrario, entre los incentivos se encuentra el incremento de suelo urbano planificado o la construcción de nuevas infraestructuras.

En determinadas situaciones, la cantidad y naturaleza de los cambios producidos puede dificultar la interpretación de los mismos, por lo que en el LCM se incluyen herramientas para facilitar la evaluación de los cambios esperados, tanto en forma de mapas como de gráficos. Los cambios son modelizados empíricamente a partir de un modelo matemático desarrollado en función de los cambios observados, y una capa de datos SIG referente a la transición potencial. Las transiciones pueden ser agrupadas en un subconjunto de modelos, y las variables se pueden añadir al modelo como componentes estáticos y dinámicos. El resultado de cada modelo es un mapa potencial relativo a cada transición o una expresión del tiempo específico de cada cambio potencial.

Existen controles para una predicción dinámica de los procesos de cambio en los usos del suelo. Después de especificar una fecha de finalización, la cantidad de cambio en cada transición puede ser modelada a través

de un análisis mediante cadenas de Markov, o mediante una matriz de transiciones probables procedente de un modelo externo. Se proporcionan dos modelos básicos de predicción: Un modelo de predicción suave (soft), que da como resultado un mapa de vulnerabilidad al cambio para el conjunto de transiciones seleccionadas, y un modelo de predicción dura (hard), fundamentado en un modelo de competitividad multi-objetivo, y que da lugar a una única realización a partir de muchas posibles.

Para mejorar la aplicación del modelo de predicción de cambios, el LCM permite la entrada de variables dinámicas, así como la planificación de intervenciones.

6.2.5.2. MARKOV.

El módulo de las cadenas de Markov (función Markov) simula la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados precedentes. Esto implica que la modelización no tiene en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema que, en nuestro caso, corresponde a la evolución de los usos del suelo.

Se trata de un procedimiento discreto en un tiempo discreto, en donde el valor en el tiempo t_1 depende de los valores en los tiempos t_0 y $t-1$ (cadena markoviana de segundo orden). El algoritmo compara dos mapas de uso del suelo que se suceden cronológicamente, y estima y configura una matriz de probabilidad de transición. La predicción se materializa en una serie de mapas de uso del suelo (uno para cada categoría) para un tiempo futuro, en donde el nivel digital de cada píxel expresa la probabilidad de pertenecer a la categoría analizada.

La aplicación de este módulo a series cronológicas ofrece como resultados una matriz de probabilidades de transición entre todas las categorías de ocupación del suelo, una matriz de áreas de transición donde se indica el número de píxeles que pueden sufrir una transformación (necesaria para la aplicación posterior de la función CA_Markov), y, por último, una serie de mapas de probabilidad condicional (0-1) para cada una de las categorías en el tiempo t_1 , como proyección desde t_0 . Para ello se considera el número de unidades temporales, que definen el número de iteraciones, transcurridos entre $t-1$ y t_0 , y entre esta última fecha y la que se pre-

tende modelizar (t_1), asumiendo una evolución lineal. A este respecto hay que indicar que una de las limitaciones del algoritmo de las cadenas markovianas es la necesidad de contar con las mismas categorías en todas las fechas de la serie temporal, de tal forma que la desaparición o nueva aparición de alguna de ellas impide aplicar el método.

6.2.5.3. CA_Markov.

Este módulo que combina las funciones Celular Autónoma, Markov Chain, Multi-Criteria y Multi-Objective Land Allocation (MOLA), añade un análisis de contigüidad espacial que hace posible la asignación de la distribución espacial de las transiciones al análisis de cadenas markovianas. CA_Markov utiliza los resultados obtenidos desde el módulo Markov de Idrisi para estimar la localización y cantidad de cambio, siendo característica su distribución de las superficies estimadas para cada categoría mediante mapas de aptitud de localización. Sus características, similitudes y diferencias respecto al LCM se estudian ampliamente en el apartado 6.4.

6.2.5.4. Otras herramientas

Entre las más utilizadas se encuentran Geomod, Grass, Clue, LTM, Sleuth, o las que se describen a continuación: Moland y Dinamica Ego.

Moland

El proyecto Monitoring Land Use Cover Dynamics (MOLAND) coordinado por el Instituto para el medioambiente y la sostenibilidad de la European Commission's Joint Research Centre, tiene como objetivo proveer de información actualizada y comparable de los usos del suelo pasado, presente y futuro (Barredo et al, 2006) a través de su modelización basada en los autómatas celulares. Es particular su enfoque en el análisis de la fragmentación en paisajes urbanos (Paegelow et al, 2008)

Dinamica

En Latinoamérica uno de los principales referentes en simulación del cambio de usos del suelo es el modelo Dinamica (Silveira et al. 2004), basado en Autómatas celulares y regresión logística y desarrollado por el Centro de Sensoriamento Remoto del Instituto de Geociencias de la Universidad Federal de Minas Gerais (Brasil). Es un modelo, de acceso libre y gratuito, que originariamente

fue concebido como un software genérico para simular la dinámica de cambio del paisaje en el Amazonas, y actualmente en su versión 1.6 (octubre de 2006), Dinamica EGO (Environment for Geoprocessing Objetc) añade a las tradicionales herramientas GIS, módulos de simulación específicos para analizar fenómenos espaciales complejos (Oliveira et al. 2007). Su carácter abierto tanto en su uso como en su programación le confiere una gran versatilidad para el diseño de modelos espaciotemporales. Este software ha sido utilizado en numerosos estudios para la modelización del crecimiento urbano y dinámicas intraurbanas como se refleja en Almeida et al. (2003), en Godoy et al. (2005) y en Paegelow et al. (2008).

6.3. Modelización prospectiva del paisaje y los usos del suelo.

La utilización de modelos en el ámbito de la planificación territorial y urbana ha pasado desde los años 60 y 70 donde se utilizaban como método de resolución de problemas (enfoque finalista), a tener un carácter prospectivo, donde el objetivo a perseguir es la generación de escenarios que ayuden a reducir la incertidumbre en los procesos de planificación (Prato, 2007). Modelizar un territorio, la ocupación o usos del suelo, contribuye a comprender y prever su evolución futura, y la simulación prospectiva proporciona una eficaz herramienta de ayuda a la decisión. Los grupos de trabajo implicados en esta línea de investigación son cada vez más numerosos y las aplicaciones pueden enfocarse hacia dinámicas ambientales variadas y complejas: deforestación en regiones tropicales (Mas et al, 2004), reforestación natural en la montaña europea, cambios de paisaje y crecimiento urbano (Gómez, 2005 y Aguilera, 2006), etc. La bibliografía sobre aspectos metodológicos relacionados con los modelos de simulación es también prolija. Brimicombe (2003), aborda cómo la complementariedad entre los SIG, los modelos de simulación para problemas ambientales y la ingeniería ofrece enormes posibilidades para construir sistemas de apoyo a la decisión muy versátiles. En esta obra, los estudios de caso integran siempre la componente espacio-temporal y cuestiones metodológicas como la validación de los modelos que se analizan y discuten.

En la obra de Kanevski et al. (2004), aunque centra-

da principalmente en geoestadística y en modelos de predicción espacial, se reflexiona acerca de aspectos metodológicos de modelos basados en redes neuronales, inteligencia artificial, simulaciones estocásticas y otras herramientas basadas en SIG. Wainwright et al. (2004) realizan una revisión de métodos y herramientas, calibración, validación y errores de la modelización, así como una reflexión sobre el futuro de la modelización ambiental. Petry et al. (2005) publica un interesante trabajo acerca de cómo la lógica borrosa y los modelos basados en ella son cada vez más útiles en modelización espacial e inciden en las soluciones para las aplicaciones geográficas especialmente si los límites entre las entidades geográficas son continuos y no discretos.

Aguilera (2006 y 2008) realiza un importante acercamiento a las dinámicas de crecimiento urbano y a sus patrones de ocupación mediante un modelo basado en autómatas celulares, diseña un conjunto de instrumentos (métricas de análisis espacial) que permiten valorar y evaluar diferentes alternativas de desarrollo metropolitano y plantea un interesante modelo conceptual de un sistema de ayuda a la planificación mediante la integración de estos criterios e instrumentos.

La obra de Paegelow et al. (2008), donde se enmarcan una serie de estudios sobre dinámicas ambientales diversas (agricultura intensiva, reforestación y deforestación, sistema de apoyo a la decisión, modelización retrospectiva, crecimiento urbano), señala la necesidad de profundizar en la comparación metodológica de una serie de modelos de simulación y en una propuesta de reflexión acerca de la idoneidad de los mismos en función del tipo de dinámica ambiental o de usos del suelo, lo que puede aportar soluciones más adaptadas a sus problemáticas. Para lograr estos objetivos se están aplicando diversas herramientas geomáticas (basadas en SIG) a áreas de estudio de dinámica específica, con una estructura de trabajo uniforme y centrándose particularmente en la comparación de las fases de aplicación de los modelos (calibración y validación) y en los avances temáticos extraídos de su utilización.

La utilización de diferentes modelos de simulación espacio-temporal para proyectar los cambios de ocupación del suelo y, en particular, el fenómeno de crecimiento urbano, está configurando una línea de trabajo cada vez más afianzada en el mundo de las Tecnologías de

la Información Geográfica (TIGs) (ver Pérez et al. 2004). Proyectos de investigación como SIMURBAN, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia español y donde se integran los trabajos de varios grupos de trabajo de 4 universidades españolas, los trabajos recogidos en Paegelow et al. (2008), o más recientemente los de Aguilera et al. (2009, 2011), o Plata et al. (2009, 2010), avalan este hecho.

6.4. Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de uso del suelo.

Evaluación del potencial de cambio: Comparativa entre CA_Markov y LCM.

En las siguientes aplicaciones, se describe, caracteriza y modeliza las transiciones que pueden producirse entre categorías de dos estados temporales distintos. Para ello, se establecen relaciones entre variables explicativas del cambio de uso y sus transiciones mediante el cálculo de redes neuronales. Las cadenas de Markov y la evaluación multiobjetivo permitirán por último estimar las superficies de cambio y su localización.

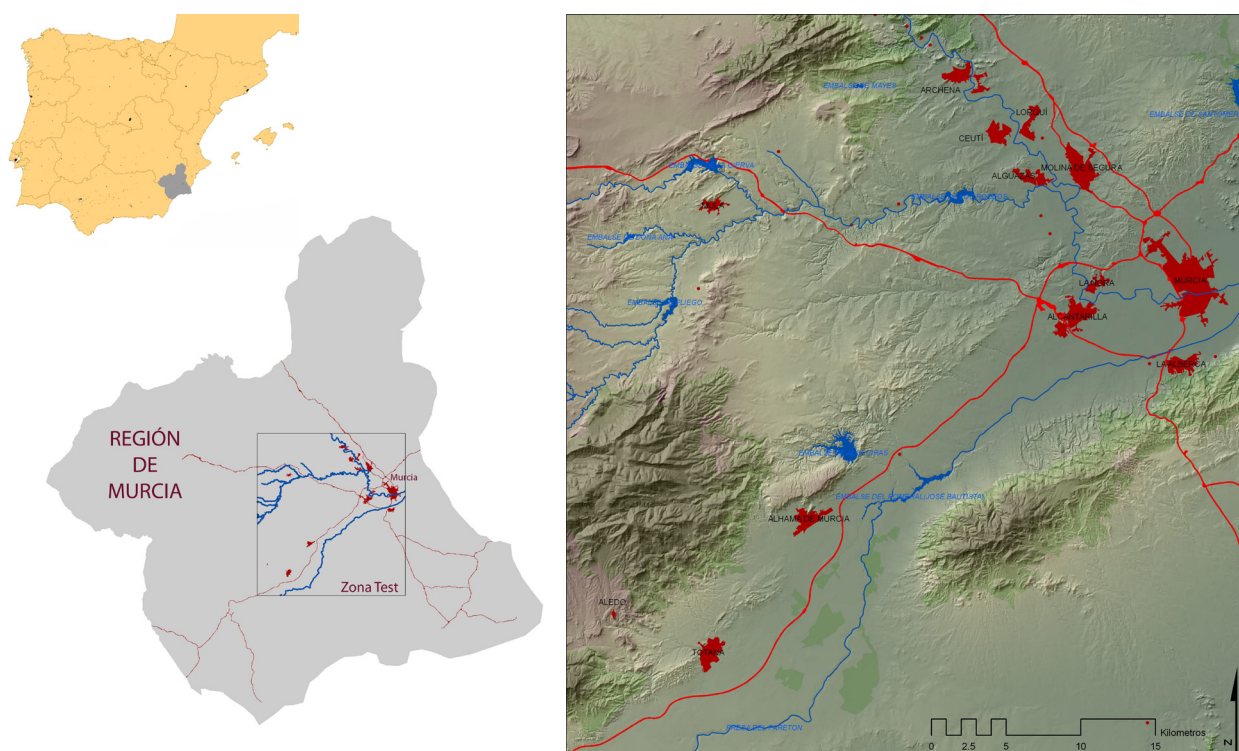
6.4.1. Ámbito de estudio

El ámbito espacial elegido para la comparación de los dos modelos (CA_Markov y LCM) se sitúa en el sureste español, concretamente en la región murciana, con fuertes dinámicas de transformación de usos ligados sobre todo a la gestión del agua en sus fértiles vegas y al fenómeno urbanístico. Para el ensayo y validación de las metodologías y algoritmos, se elige una zona de 2270 km² de extensión (marco de 50 km x 45 km) que comprende gran parte de la vega media del río Segura, la cuenca del Mula y el valle del Guadalentín (Figura 6.3).

Las series cronológicas de usos del suelo para los años 1990, 2000 y 2006 se obtienen por agrupación de las categorías de nivel 3 del proyecto Corine Land Cover. Las cartografías transformadas, las categorías originales y los 7 usos resultantes se reflejan en la figura 6.4:

Así mismo se han considerado, como variables explicativas de las dinámicas existentes, las cartografías de los núcleos urbanos, red viaria, red hidrográfica, red de acequias, hipsometría, clinometría y orientaciones,

FIGURA 6.3. Ámbito del estudio en la cuenca del río Segura. Elaboración propia.



CLC niv. 3	CAT
Superficies artificiales	
11100 Tejido urbano continuo	1
11210 Estructura urbana abierta	1
11220 Urbanizaciones exentas y/o ajardinadas	1
12110 Zonas industriales	1
12120 Grandes superficies de equipamientos y servicios	1
12210 Autopistas, autopistas y terrenos asociados	1
12220 Complejos ferroviarios	1
12300 Zonas portuarias	1
12400 Aeropuertos	1
13100 Zonas de extracción minera	1
13200 Escombreras y vertederos	1
13300 Zonas en construcción	1
14100 Zonas verdes urbanas	1
14210 Campos de golf	1
14220 Resto de instalaciones deportivas y recreativas	1
Zonas agrícolas	
21100 Tierras de labor en secano	7
21210 Cultivos herbáceos en regadío	6
21220 Otras zonas de irrigación	6
21300 Arrozales	6
22110 Viñedos en secano	6
22120 Viñedos en regadío	6
22210 Frutales en secano	7
22221 Olivos	6
22222 Frutales tropicales	6
22223 Otros frutales en regadío	6
22310 Olivares en secano	6
22320 Olivares en regadío	6
23100 Prados y praderas	4
24110 Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en secano	6
24120 Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes en regadío	6
24211 Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en secano	7
24212 Mosaico de cultivos permanentes en secano	7
24213 Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en secano	6
24221 Mosaico de cultivos anuales con prados o praderas en regadío	6
24222 Mosaico de cultivos permanentes en regadío	6
24223 Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes en regadío	6
24310 Mosaico de cultivos en secano con espacios sign. de vegetación natural y semi-natural	7
24320 Mosaico de cultivos en regadío con espacios sign. de vegetación natural y semi-natural	7
24330 Mosaico de prados o praderas con espacios sign. de vegetación natural y semi-natural	7
24410 Pastizales, prados o praderas con arbolado adhesionado	3
24420 Cultivos agrícolas con arbolado adhesionado	6
Zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos	
31110 Páramos	3
31120 Caducifolias y marcescentes	3
31130 Otras frondosas de plantación	3
31140 Mezcla de frondosas	3
31150 Bosques de ribera	3
31160 Laurisilva macaronésica	3
31210 Bosques de coníferas con hojas aciculares	3
31220 Bosques de coníferas con hojas de tipo cupresáceo	3
31300 Bosque mixto	3
32111 Pastizales supraforestales templado-oceánicos, pirenaicos y occidibáricos	4
32112 Pastizales supraforestales mediterráneos	4
32121 Otros pastizales templado-oceánicos	4
32122 Otros pastizales mediterráneos	4
32210 Landas y matorrales en climas húmedos. Vegetación mesófila	4
32220 Fayal-brezal macaronésico	4
32311 Grandes formaciones de matorral denso o medianamente denso	4
32312 Matorrales subarborescentes o arborescentes muy poco densos	4
32320 Matorrales verticales macaronésicos	4
32410 Matorral boscoso de frondosas	4
32420 Matorral boscoso de coníferas	4
32430 Matorral boscoso de bosque mixto	4
33110 Playas y dunas	5
33120 Ramblas con poca o sin vegetación	5
33210 Rocas desnudas con fuerte pendiente (acantilados, etc.)	5
33220 Afloramientos rocosos y canchales	5
33300 Coladas lávicas cuaternarias	5
33310 Xeroestepas subdesértica	5
33320 Cárcavas y/o zonas en proceso de erosión	5
33330 Espacios orófitos altitudinales con vegetación escasa	5
33400 Zonas quemadas	5
33500 Glaciares y nieves permanentes	5
Zonas húmedas	
41100 Humedales y zonas pantanosas	2
41200 Turberas y prados turbosos	2
42100 Marismas	2
42200 Salinas	2
42300 Zonas litorales intermareales	2
Superficies de agua	
51110 Ríos y cauces naturales	2
51120 Canales artificiales	2
51210 Lagos y lagunas	2
51220 Embalses	2
52100 Lagunas costeras	2
52200 Estuarios	2
52300 Mares y océanos	2

USOS DEL SUELO

- Zonas urbanas, industriales y de transporte
- Superficies de agua y zonas húmedas
- Arbolado
- Pastizal y Matorral
- Improductivo
- Zonas agrícolas en regadío
- Zonas agrícolas en secano

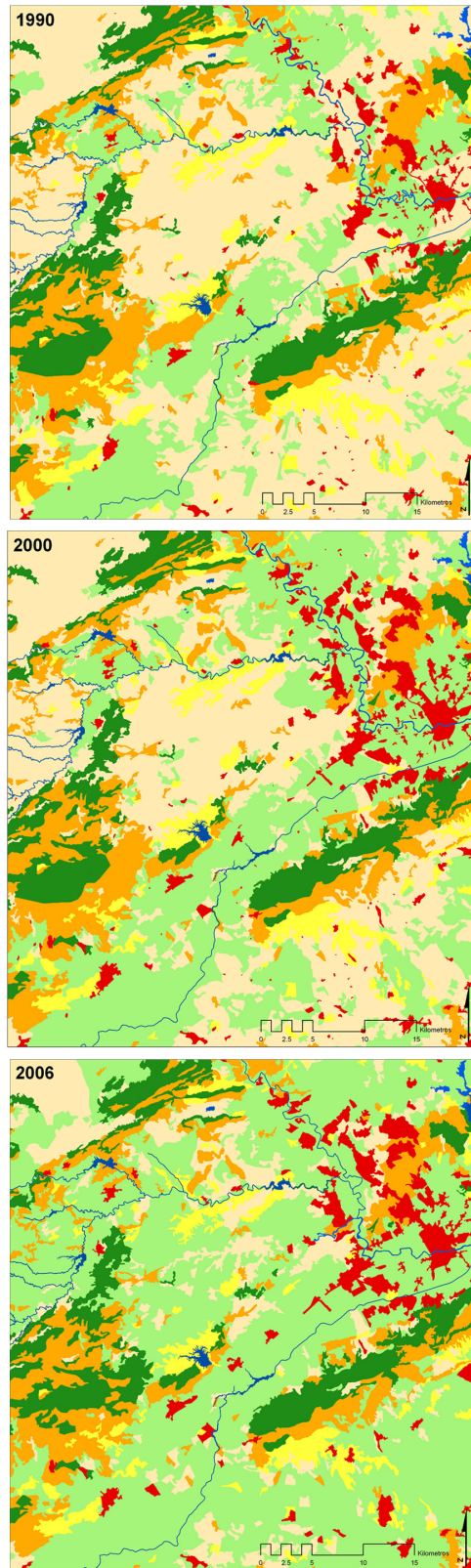


FIGURA 6.4. Categorías originales y transformadas y Usos agrupados resultantes para los usos de 1990, 2000 y 2006.

procedentes de las bases de datos utilizadas en un extenso estudio anterior (ver Gómez y Grindlay, 2008). Estas capas de información son transformadas a formato raster, siendo la resolución de pixel adoptada de 20 metros, y resultando imágenes de 2278 columnas y 2490 filas. Estas variables sirven de base para los siguientes factores considerados:

- Modelo digital de terreno (hipsometría)
- Mapa de pendientes (clinometría)
- Mapa de Orientaciones
- Distancia a los Núcleos urbanos
- Distancia a la red viaria
- Distancia a la red hidrográfica
- Distancia a la red de acequias

6.4.2. Metodología.

Los dos modelos, CA_Markov y LCM, se basan en el conocimiento de estados temporales pasados de la variable que se va a modelizar, representados en forma de mapas que describen dicho estado (con leyendas idénticas en cuanto a clases/categorías). Para ello, el usuario incorpora en el procedimiento los dos mapas de ocupación del suelo más recientes o los más significativos según la evolución pasada. El mapa simulado tendrá la misma nomenclatura (simulación discreta según Legendre et al, 1984).

Un segundo factor común concierne al cálculo de transiciones temporales que, en ambos modelos, aunque con diferencias que más adelante se comentarán, se basa en las cadenas de Markov.

Salvo estos puntos comunes (estados iniciales de la variable simulada y datos de la superficie de cada estado = categoría estimada en la fecha de simulación mediante el cálculo de transiciones condicionales probabilísticas markovianas), los dos módulos son esencialmente diferentes y, como se verá, complementarios en algunas cuestiones.

CA_Markov distribuye las superficies estimadas para cada categoría mediante los correspondientes mapas de aptitud de localización (tantos como categorías), mientras que LCM describe, caracteriza y modeliza las transiciones entre las categorías. Para ello, ambos procedimientos establecen relaciones entre variables explicativas de distinta naturaleza (drivers) y las cate-

gorías de usos del suelo o las transiciones, aunque utilizando métodos diferentes (evaluación multicriterio en CA_Markov y redes neuronales en LCM).

En las siguientes líneas se detalla esta diferencia esencial en la aplicación de ambos modelos, que concierne sobre todo a la fase de evaluación del potencial de cambio, aunque, como veremos, las particularidades son también manifiestas en la fase de localización de los cambios.

Evaluación del potencial de cambio

• CA_Markov: la noción de aptitud (suitability)
El método de modelización de CA_Markov se basa en los estados temporales de la variable y no en las transiciones potenciales entre dichos estados como lo hace LCM. Para ello, la función necesita una serie de mapas de aptitud, uno para cada categoría de ocupación/uso del suelo. La aptitud puede simplemente materializar la visión del experto o puede ser el resultado de un cálculo más complejo, reproducible y transparente: la evaluación multicriterio (MCE) (en el capítulo 6 se realiza una completa explicación). La posibilidad de mezclar ambos enfoques conduce a un grado variable de control del proceso.

Una de las diferencias respecto a LCM, es que CA_Markov no considera de manera explícita la configuración espacial de los cambios acaecidos, aunque dichos cambios sí pueden ser introducidos en forma de factores en la fase de evaluación multicriterio.

MCE aborda la aptitud como el resultado de diversos criterios. Éstos se dividen fundamentalmente en dos tipos: las restricciones (0 / 1), que indican la posibilidad o no de que la categoría exista (límites del medio natural, límites ligados a la legislación, etc...) y los factores. Estos últimos expresan un potencial variable en el espacio. Por ejemplo, la aptitud para la construcción de una vivienda varía en el espacio según varios factores: el precio del terreno, la proximidad de infraestructuras, etc. Puesto que las unidades de medida de los factores son también diversas (siguiendo el ejemplo, euros, km o minutos), en una primera etapa es necesario estandarizar, es decir, optar por un índice común a la misma escala. Esta estandarización puede realizarse de manera manual o utilizando funciones de lógica borrosa (East-

man et al, 1996). Una vez realizada esta operación, en la que los factores se vuelven comparables, éstos pueden ser ponderados gracias a diversas técnicas: de forma manual (por ejemplo, como resultado de estudios comparables o experiencias empíricas) o utilizando la matriz de Saaty (1977), que compara el peso relativo de un factor comparándolo con otro (técnica de comparación por pares, como técnica más simple, sobre todo cuando hay presentes muchos factores). El objetivo es obtener el peso final por cálculo de su vector propio.

Una segunda ponderación, de tipo contextual en este caso, autoriza diferentes niveles de compensación entre factores y de niveles de riesgo, ésta última expresada en una escala de operadores booleanos entre AND y OR (Yager, 1988).

MCE es una técnica de cálculo de aptitud sofisticada, versátil y muy potente, que muestra la localización probable de cada categoría basándose en la realidad durante las fechas del período de calibración (fase de entrenamiento del modelo) y en la que los límites son los dos mapas de ocupación del suelo elegidos.

Como se ha indicado anteriormente, los mapas de aptitud, en lugar de ser el resultado de un trabajo científico extrapolable y transparente (MCE), pueden ser elaborados siguiendo simplemente la intuición de un experto. En conclusión, se trata de una herramienta de modelización que permite un alto grado de libertad donde se pasa fácilmente, según la puesta en práctica del método, de la predicción al escenario. Por ello, para evaluar los resul-

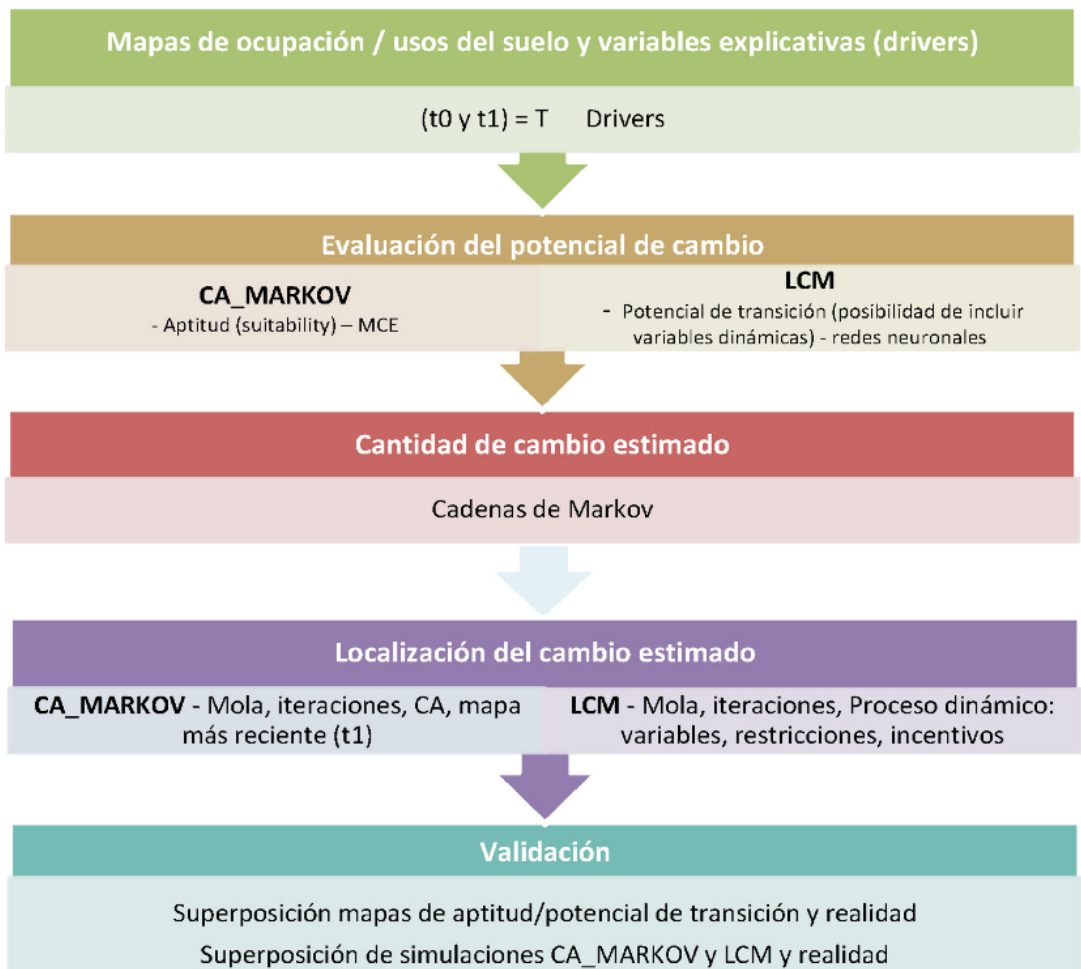


FIGURA 6.5. Comparativa de ambos modelos: CA_Markov y LCM

tados obtenidos es indispensable la descripción clara y detallada de cada uno de los pasos realizados.

- LCM: el potencial de transición

LCM aborda la simulación prospectiva teniendo en cuenta no las categorías sino el potencial de transición entre ellas, seleccionando primero las transiciones a incluir en la modelización a partir de todas las transiciones reales. Esta selección puede estar condicionada por el objetivo de la modelización (simulación de una categoría o grupo de categorías en particular), por eliminación de las transiciones con poca superficie en el conjunto de la imagen, o bien por la mayor o menor probabilidad de que las transiciones tengan lugar en la fase de simulación (periodo transcurrido entre la cartografía más reciente de la fase de calibración y la fecha de simulación proyectada). Esta probabilidad puede adquirir diversos significados: hipótesis de la continuidad de probabilidades observadas en el pasado, aceleración de cambios, cambio de hipótesis de partida para calcular diversos escenarios, etc. La hipótesis de partida es que aquellas áreas que han cambiado presentan un mayor potencial de cambio en el futuro.

A continuación cada transición elegida debe ser caracterizada por variables explicativas. Varias transiciones, regidas por las mismas reglas, pueden ser reagrupadas bajo forma de sub-modelos, asociación que facilita la puesta en práctica del modelo, especialmente cuando el mapa de ocupación/ usos del suelo presenta numerosas categorías.

Los drivers pueden ser controlados según su nivel de significación y transformados según varias opciones disponibles en LCM. Esta transformación está determinada, por otra parte, por el modelo de evaluación que se aplique posteriormente a cada transición (por ejemplo, la regresión logística múltiple exige una transformación lineal de las variables respecto al potencial de transición). Por otra parte las variables categóricas o nominales deben ser transformadas bien en una serie de variables booleanas o utilizando la transformación de máxima verosimilitud, que se basa en la comparación de los mapas de transición (mapa binario de cada transición, con zonas que cambian y zonas que permanecen) y la frecuencia relativa de las distintas categorías de la variable.

La caracterización de estas variables incluye también la posibilidad de considerar algunas de ellas como variables dinámicas, es decir, que pueden evolucionar durante la simulación (cercanía a alguna categoría de usos del suelo, distancia a infraestructuras, etc.).

El potencial de transición, por sub-modelo, es a continuación evaluado ya sea por regresión logística múltiple, o por redes neuronales (Multi-Layer Perceptron, MLP). La utilización de algoritmos de inteligencia artificial (redes neuronales en particular) permite obtener generalmente mejores resultados y compete de forma aventajada con la aproximación estadística de tipo probabilística, especialmente con las series cronológicas (Bishop, 1995; Parlitz et al, 2000; Lai et al, 2001, y Li et al, 2002;).

- Cantidad y localización del cambio estimado

Tanto en CA_Markov como en LCM, la cantidad de cambio estimado es obtenida a partir de una matriz markoviana (Metropolis et al, 1949 y Coquillard et al, 1997), método probabilístico que calcula las áreas (número de píxeles) y las probabilidades de transición entre dos mapas de ocupación / usos del suelo. Estos mapas, que constituyen los datos de la fase de calibración, son el punto de partida para proyectar los cambios estimados en una fecha posterior.

CA_Markov utiliza los resultados obtenidos desde el módulo Markov de Idrisi mientras que aunque la opción por defecto en LCM es la misma, las transiciones markovianas pueden ser reemplazadas en este módulo por un cálculo externo. Dicho esto, incluso optando por la matriz de Markov para el cálculo de las transiciones probabilísticas condicionales, es importante señalar que CA_Markov autoriza un nivel de confianza en los datos muy amplio mientras que LCM si embargo no permite esta variación del nivel de confianza. Por ello, para garantizar la comparación de los resultados, conviene importar la matriz markoviana, calculándola directamente con el módulo Markov.

Por otra parte, CA_Markov incorpora en la modelización los mapas de usos del suelo (en concreto el más reciente), y usa esta información para modificar la matriz de transición, lo que constituye también una particularidad de este modelo.

Una vez calculada la cantidad de cambio estimado, la localización de dichos cambios es un segundo proceso que, tanto en CA_Markov como en LCM, se basa en la elección de aquellos píxeles más aptos o de mayor potencial de cambio. Un algoritmo de evaluación multiobjetivo soluciona los problemas de incompatibilidad entre usos o transiciones distintos. CA_Markov localiza en el espacio las transiciones markovianas calculadas, comparando la aptitud de las diferentes categorías, y proyectando la situación hacia una fecha futura. La utilización de un autómata celular básico, normalmente un simple filtro de contigüidad, permite homogeneizar el mapa simulado por agregación espacial, evitando de esta manera el aspecto pixelado bien conocido en las clasificaciones de imágenes de satélite.

En LCM, una vez modelizado el potencial de transición, la predicción se basa, por defecto, en la matriz markoviana antes mencionada. LCM permite, además, la conversión de la simulación en un proceso dinámico, al recalcular en cada paso temporal (simulación discreta) ciertas condiciones como la modificación de la red viaria, las distancias de unas categorías respecto a otras, o incluso la inserción en la simulación de eventos futuros planificados o previstos (zonas de protección, figuras de planeamiento). LCM, por tanto, no sólo incluye variables dinámicas sino que, además, permite explicitar los cambios que van a producirse en ciertas variables, lo que en CA_Markov sólo puede ser introducido de manera implícita en los mapas de aptitud.

Otra cuestión importante que diferencia ambos modelos es la inclusión de las restricciones e incentivos, que, si bien en CA_Markov, forma parte de la fase de evaluación multicriterio, en LCM es una opción de la fase de predicción, que puede aplicarse a cada transición de manera individual o a grupos de ellas.

6.4.3. Resultados

Potencial de cambio

- Mapas de aptitud (Suitability). CA_Markov.

Tras un proceso de estandarización (Fuzzy) de los factores y sin la introducción de ningún tipo de restricción ni compensación de factores (OWA), se utiliza el método AHP (Analytical hierarchy process), ya tratado en el capí-

tulo 6, que como resultado genera los pesos o coeficientes de ponderación.

En este proceso analítico, se realizan comparaciones por pares entre los 7 factores para cada uno de los usos y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por los expertos, entregando una síntesis de las mismas mediante la agregación de esos juicios parciales. Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica propuesta por Saaty, que va desde 1 hasta 9. Una vez generados los coeficientes de ponderación, se comprueba que el ratio de consistencia sea menor de 0,1 y se procede a la combinación de los factores para la obtención de las cartografías de capacidad de uso o aptitud (GIS Analysis/ Decision Support/MCE).

Se muestran a continuación algunas de estas cartografías. Las leyendas reflejan el potencial de cambio de uso con valores bajos (verde oscuro) para las áreas con menos predisposición al cambio y valores cercanos al 255 (rojo oscuro) para aptitudes del territorio altas (Figura 6.6).

- Mapas de potencial de transición. LCM.

De un total de 29 transiciones reales entre los mapas de usos del suelo de 1990 y 2000, se ha optado por modelizar tan sólo 13 transiciones (Figura 6.7), una vez eliminadas aquellas cuya superficie es inferior a los 5000 píxeles. De estas 13 transiciones se han configurado 9 sub-modelos, al unir los cambios desde distintos usos a “zonas urbanas, industriales y de transporte” (4 transiciones) y los cambios desde “pastizal y matorral” e “improductivo” a “zonas agrícolas de regadío” (2 transiciones).

El resto de las transiciones han configurado un sub-modelo propio, incluido el cambio de “zonas agrícolas en secano” a “zonas agrícolas en regadío”, puesto que se trata de un tipo de transformación específica y que responde a criterios distintos a la nueva puesta en práctica de cultivos en regadío (Tabla 6.1).

Las variables explicativas han sido transformadas según su naturaleza. Se ha aplicado una transformación logarítmica lineal de los mapas de distancia a determinadas infraestructuras y elementos (red viaria, red de ace-

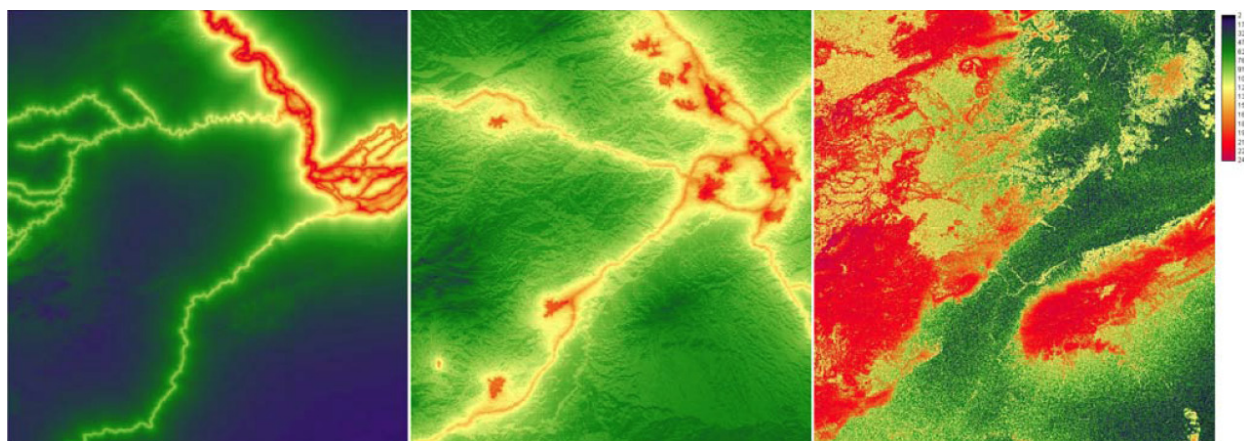


FIGURA 6.6. Mapas de Aptitud para los usos “zonas agrícolas de regadío”, “zonas urbanas, industriales y de transporte” y “arboreado”. (en rojo las zonas con mayor capacidad de uso)

quias, núcleos urbanos, etc.). Las variables así transformadas adquieren un formato único y se han utilizado para configurar los sub-modelos de algunas de las transiciones o grupos de ellas. La transformación basada en máxima verosimilitud se ha aplicado a diversas variables de naturaleza cuantitativa (Modelo digital del terreno, mapa de pendientes, etc.). Para ello se ponen en relación las categorías de la variable y las áreas que cambian o no en cada mapa de transición (mapa booleano), de tal manera que el resultado de la transformación de una variable es diferente para cada una de las transiciones. Ninguna variable ha sido considerada como dinámica para facilitar la comparación con el resultado obtenido con CA_Markov.

LCM facilita testar la significación de las variables al obtener los índices Cramer's V entre las variables transformadas y la distribución de las categorías de usos del suelo de la fecha más reciente (2000). Si bien un alto índice Cramer's V no garantiza una buena modelización, un bajo índice sí es un indicativo de la conveniencia de no incluir en el sub-modelo la variable transformada (Clark labs, 2006-2010). Otra cuestión es la validez de tal índice de asociación en el que se acude a comparar variables con categorías de usos del suelo, cuando el funcionamiento de LCM se basa, como ya venimos indicando, en la modelización de las transiciones.

El modelo Multi-Layer Perceptron (MLP) se ha aplicado a cada uno de los sub-modelos de transición (9) y el resultado es la obtención de 13 mapas de potencial de transición, que son la plasmación espacio-temporal del

potencial de cambio (En la figura 6.8 se muestran dos de ellos a modo de ejemplo). Las leyendas, que oscilan de 0 a 1, indican el potencial que cada píxel presenta para cambiar de una categoría a otra. Aunque el modelo trabaja con todos los parámetros que el usuario ha introducido en los sub-modelos, LCM selecciona en primer lugar los píxeles de la categoría inicial de cada transición y aplica una máscara para obtener un resultado más acorde con la realidad.

Cantidad de cambio estimado y localización de los cambios.

Ambos modelos se basan en la matriz de probabilidades de transición obtenida mediante la función Markov (Cadenas de Markov) para establecer la cantidad de cambio estimada en 2006 (Tabla 7.2).

• Simulación 2006 con CA_Markov

A partir de la última imagen de usos utilizada en el análisis de cambios, la del año 2000, que es usada como punto origen de la modelización, con las áreas de transición de Markov y con la agrupación de imágenes de aptitud de localización (File/collection editor), CA_Markov genera la imagen estimada para el año 2006.

La utilización del autómatas celular como filtro de contigüidad de 5x5 celdas, permite homogeneizar el mapa simulado por agregación espacial, evitando de esta manera el aspecto pixelado que se obtiene con LCM. El número de iteraciones elegidas establecen el número de intervalos de tiempo usados en la simulación, siendo en

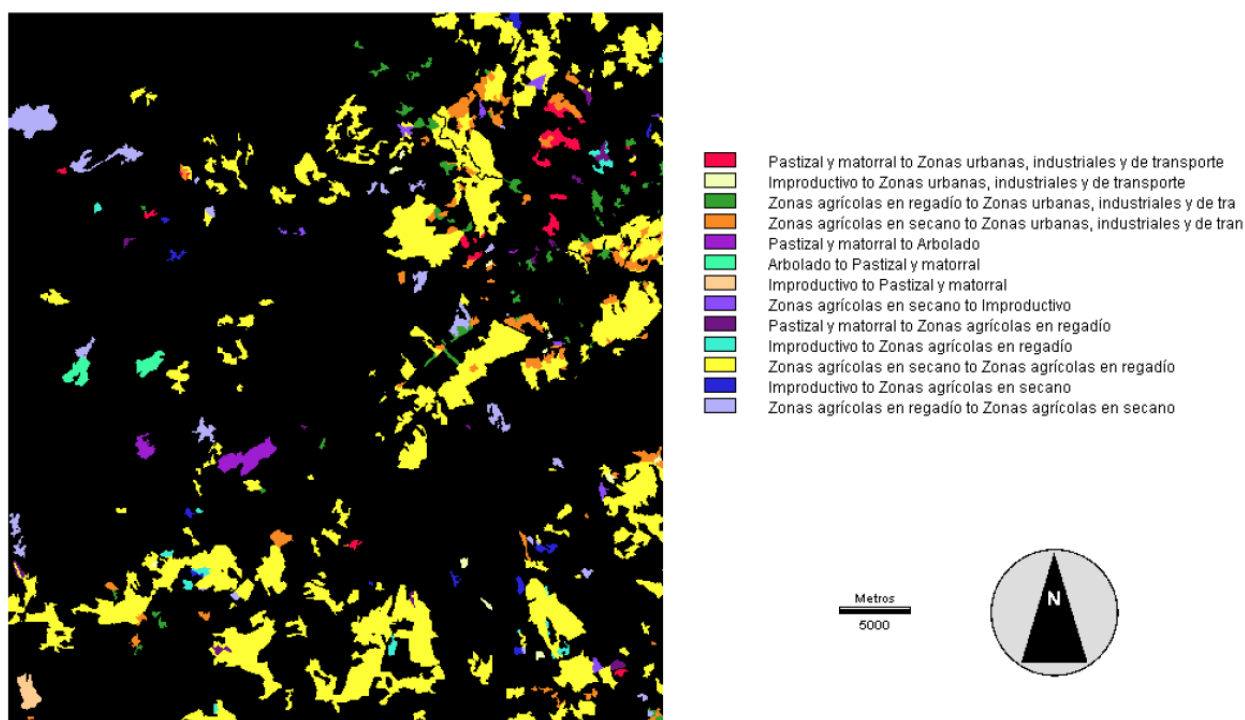


FIGURA 6.7. Transiciones 1990-2000

TRANSICIONES		SUBMODELO
Pastizal y matorral a Zonas urbanas, industriales y de transporte	4-1	1
Improductivo a Zonas urbanas, industriales y de transporte	5-1	
Zonas agrícolas en regadío a Zonas urbanas, industriales y de transporte	6-1	
Zonas agrícolas en seco a Zonas urbanas, industriales y de transporte	7-1	
Pastizal y matorral a Arbolado	4-3	2
Arbolado a Pastizal y matorral	3-4	3
Improductivo a Pastizal y matorral	5-4	4
Zonas agrícolas en seco a Improductivo	7-5	5
Pastizal y matorral a Zonas agrícolas en regadío	4-6	6
Improductivo a Zonas agrícolas en regadío	5-6	
Zonas agrícolas en seco a Zonas agrícolas en regadío	7-6	7
Improductivo a Zonas agrícolas en seco	5-7	8
Zonas agrícolas en regadío a Zonas agrícolas en seco	6-7	9

TABLA 6.1. Transiciones 1990 - 2000 y sub-modelos.

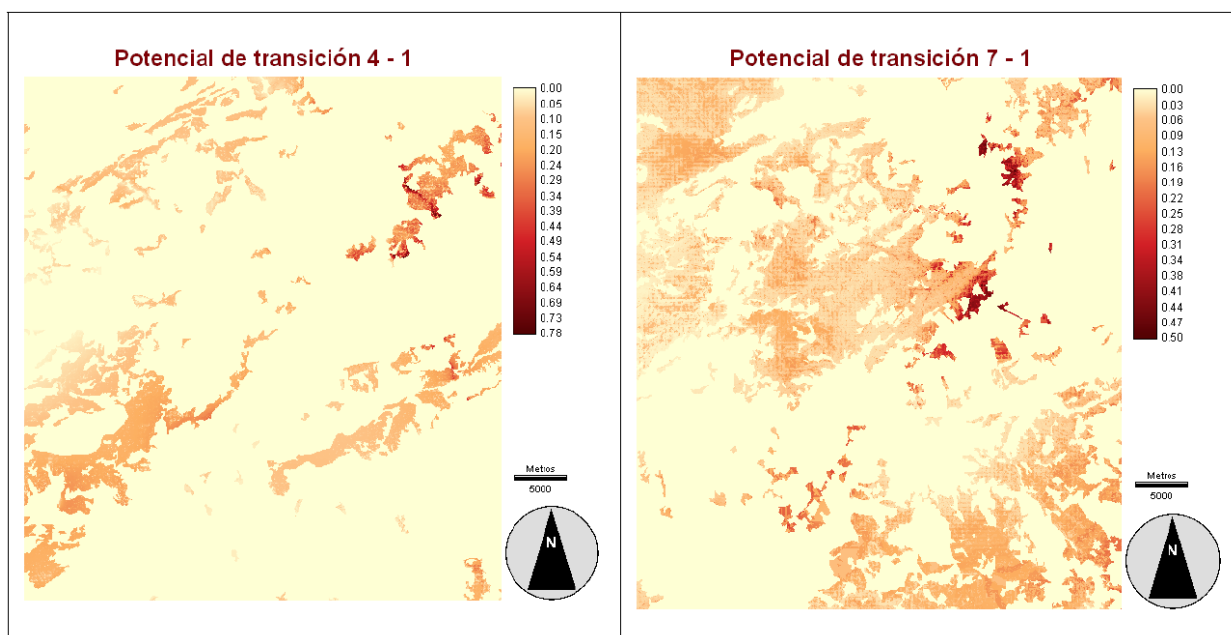
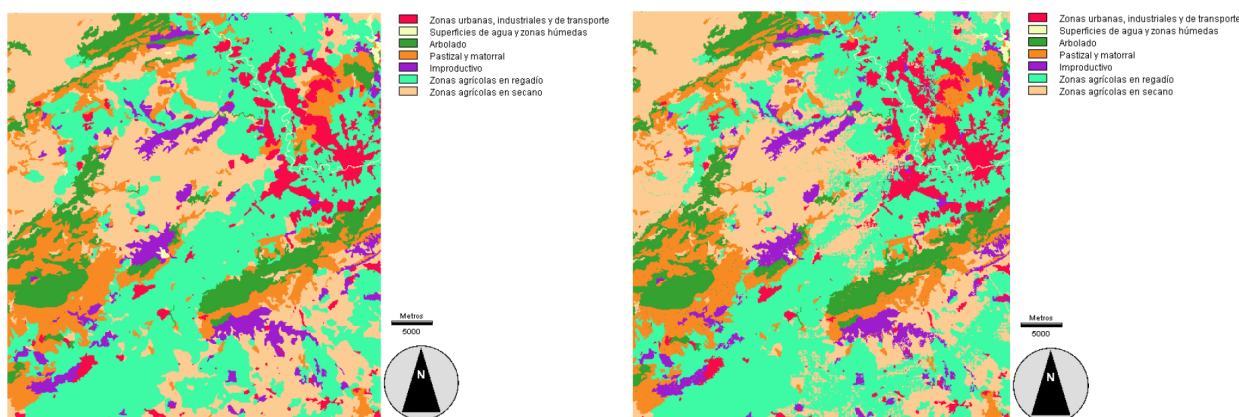


FIGURA 6.8. Ejemplos de mapas de potencial de transición

CATEGORÍAS	1	2	3	4	5	6	7
1	0.9964	0.0000	0.0000	0.0027	0.0000	0.0009	0.0000
2	0.0000	0.9679	0.0000	0.0000	0.0000	0.0321	0.0000
3	0.0010	0.0000	0.9855	0.0118	0.0002	0.0009	0.0005
4	0.0130	0.0000	0.0114	0.9675	0.0002	0.0067	0.0012
5	0.0088	0.0024	0.0000	0.0107	0.9433	0.0175	0.0174
6	0.0138	0.0007	0.0000	0.0011	0.0000	0.9601	0.0243
7	0.0148	0.0000	0.0001	0.0010	0.0020	0.1696	0.8124

TABLA 6.2. Probabilidad de transición 2006. cadenas de Markov



FIGURAS 6.9. y 6.10. Simulación para el año 2006. CA_Markov (Izquierda) y LCM (derecha)

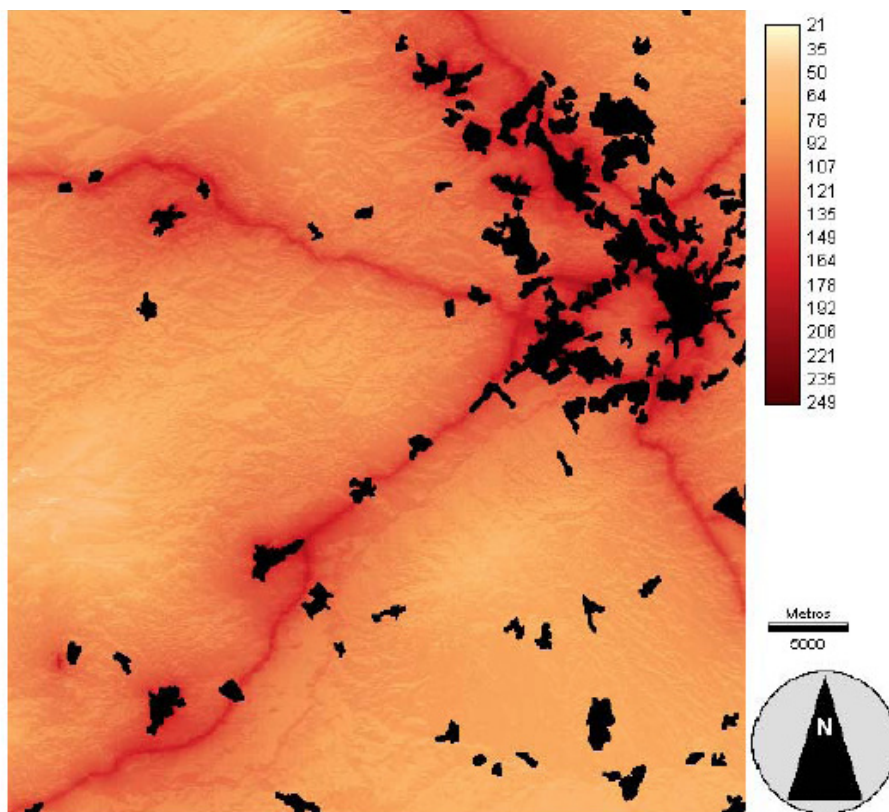
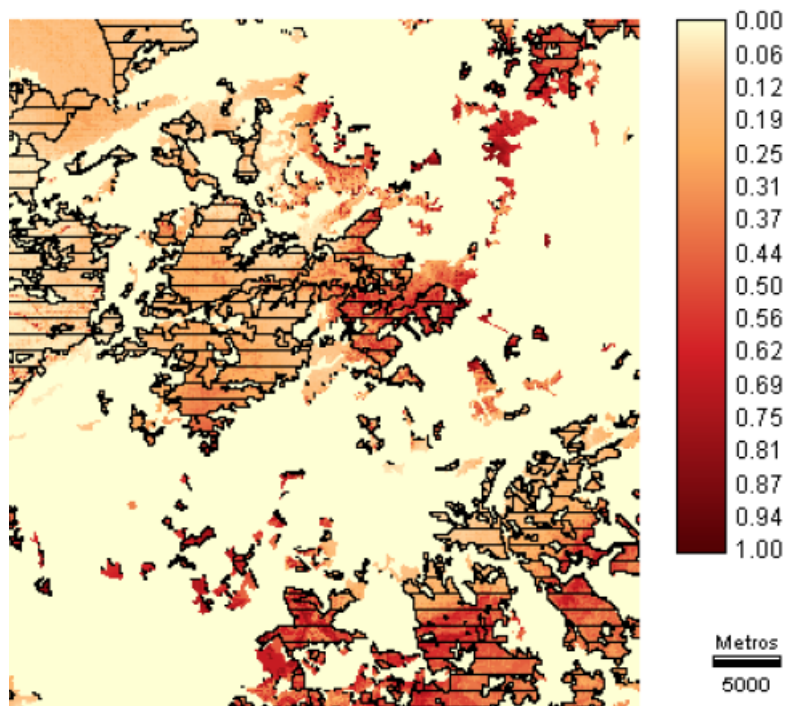


FIGURA 6.11. Superposición de los cambios reales (negro) sobre el mapa de aptitud a la urbanización generado mediante MCE



FIGURAS 6.12. Superposición de la transición real del seco al regadío (7-6) entre 200 y 2006 (tramas de líneas horizontales) sobre el mapa de potencial de transición obtenido mediante MLP de LCM.

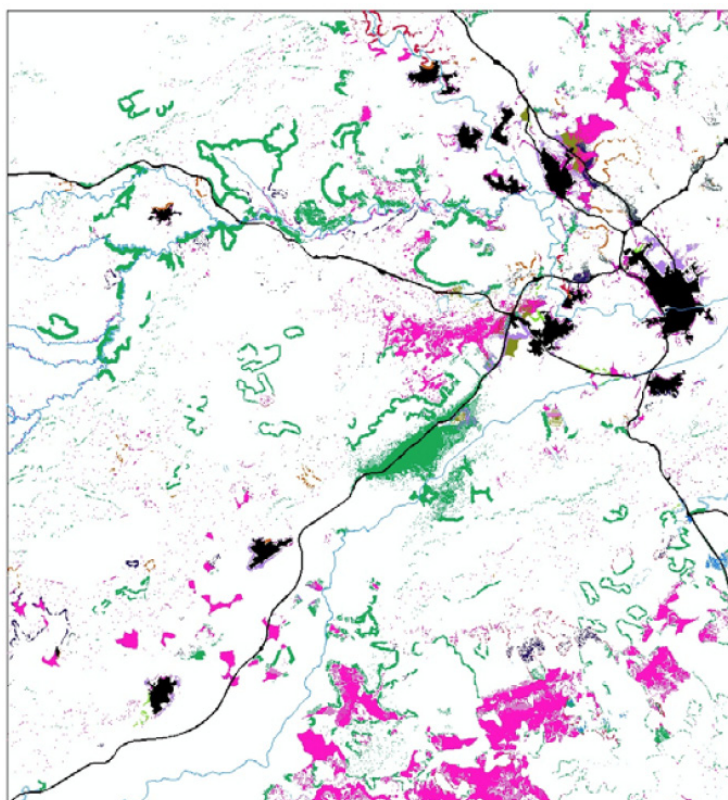


FIGURA 6.13. Distribución espacial de las diferencias entre las simulaciones obtenidas por ambos modelos.

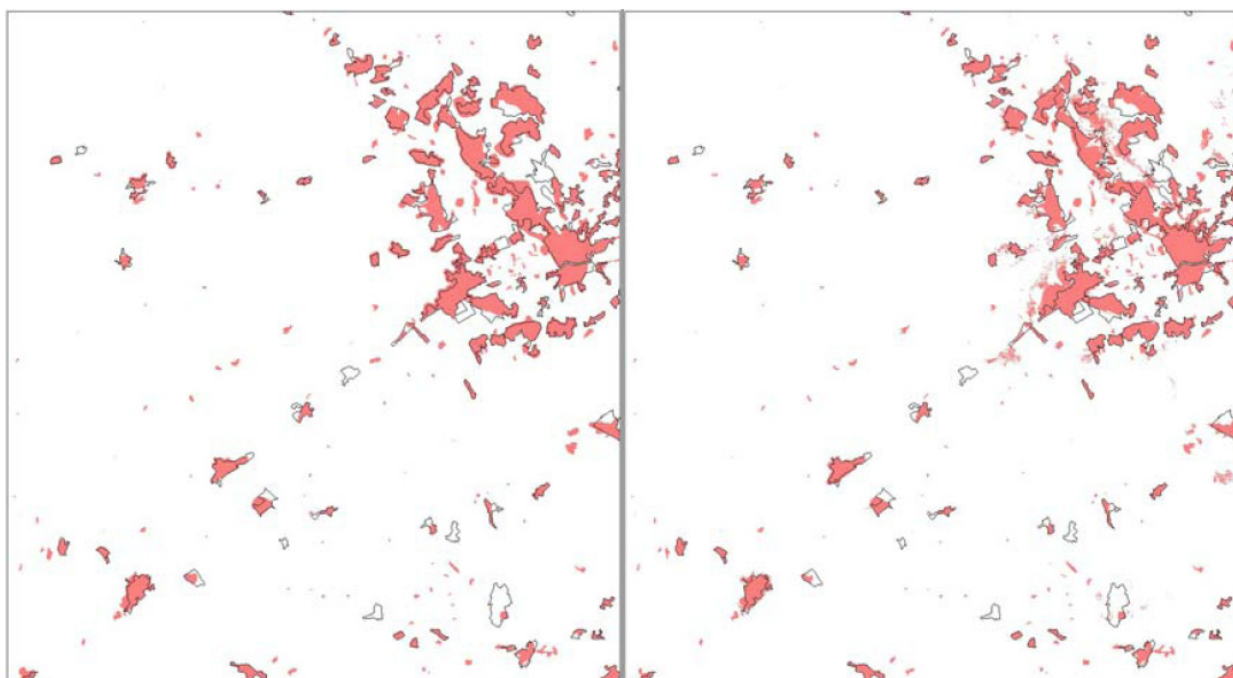


FIGURA 6.14. Comparativa de resultados de los dos modelos (CA_Markov a la izquierda y LCM a la derecha) para el uso urbano en 2006. Los contornos en negro representan el estado real.

este caso 6 las iteraciones hasta el año horizonte.

- Simulación 2006 con LCM

Para facilitar la comparación de resultados, se ha aplicado el modelo básico de LCM, sin inclusión de restricciones, incentivos o variables dinámicas. El resultado es una simulación (hard) para 2006, que es el escenario previsto para las mismas categorías de ocupación / usos del suelo cartografiadas en 1990 y 2000.

La evaluación multiobjetivo (MOLA) y un módulo interno de Idrisi (CHGALLOC) determinan las categorías que ganan y aquéllas que pierden superficie de acuerdo a la matriz de Markov y, por último, localizan los cambios en las áreas de mayor potencial según los mapas obtenidos tras aplicar MLP.

6.4.4. Discusión y conclusiones.

Los resultados obtenidos permiten comparar la especificidad de cada uno de los modelos en la fase de calibración, los métodos para la transformación de variables o la localización de los cambios estimados y empezar a descubrir las limitaciones y las ventajas propias de cada uno, previamente a su aplicación en un área más extensa.

Mediante operaciones de superposición entre las imágenes simuladas (transiciones y mapas de capacidad de uso) y entre estas y el mapa real de usos para el año 2006, es posible validar los resultados, comparar los ajustes entre las áreas generadas y las reales y detectar desviaciones en las dinámicas o errores a corregir. En la figura 6.9 se muestra la localización de las áreas urbanizadas sobre el mapa de aptitud hacia la urbanización cuyo ajuste parece más que aceptable.

La superposición píxel a píxel de cada una de las transiciones reales entre 2000 y 2006 (mapas binarios obtenidos a partir de los mapas de usos del suelo Corine Land Cover de estas fechas) y de los correspondientes mapas de potencial de transición obtenidos por MLP, permite también valorar la validez de estos resultados.

A modo de ejemplo, la figura 6.10 muestra las áreas que cambian de seco a regadío (transición 7-6), resaltadas con una trama de líneas horizontales, y el potencial de transición de seco a regadío como fondo de la ima-

gen, con valores que oscilan de 0 a 1. Se observa un buen ajuste entre ambos mapas, destacando que la mayoría de los polígonos de cambio real se encuentran sobre la superficie de mayor potencial.

La distribución de las dinámicas que cada modelo ha simulado de forma diferente se refleja en la figura 6.11, destacando por su extensión algunas transformaciones de seco a regadío en las que CA_Markov ha sido más generoso (en verde) y otras en las que lo ha sido LCM. (en magenta). Estas diferencias podrían ser justificables por el diferente grado de intervención de los modelos para establecer la relación entre las variables explicativas y las dinámicas estudiadas.

La homogeneización por contigüidad realizada por el filtro del autómata celular en CA_Markov produce resultados algo más limpios que justifican el alto tiempo del proceso en esta área test pero que podría limitar su uso en grandes extensiones o condicionar la resolución del píxel. Se observan algunos desajustes en la modelización final de ambos modelos si la comparamos con la realidad. El desajuste de mayor superficie es el que afecta a lo previsto como “superficie de seco” y que en realidad se trata de “superficie de regadío”. El aumento espectacular de esta última categoría entre 2000 y 2006 puede explicar este hecho por lo que parece necesario, en una etapa posterior, una revisión más profunda y detallada de las variables explicativas de las dinámicas de transformación para este uso. Por otra parte, el aspecto pixelado de la imagen generada por LCM corresponde fundamentalmente a las categorías menos frecuentes, y en donde la simulación no ha tenido en cuenta la agregación de píxeles. Otros usos como el urbano son simulados de forma más correcta por ambas herramientas tal y como se aprecia en la figura 6.12.

A modo de conclusión parcial de la comparación de estos dos herramientas de modelización, es necesario indicar que, si bien ambos son modelos de simulación espacio-temporal aplicables a los cambios de ocupación / usos del suelo, sus métodos (categorías versus transiciones) son esencialmente diferentes, y la comparación de resultados no está garantizada si no se toma la precaución de que haya una perfecta transparencia en su puesta en práctica. Por tanto, no basta con utilizar los mismos datos y drivers. Sólo una descripción minuciosa de las opciones autoriza la comparación de los resultados y la

obtención de conclusiones sobre el comportamiento de los modelos. Por ello se ha aplicado el modelo básico tanto en LCM como en CA_Markov. En LCM no se han incluido ninguna de las opciones de planificación (incentivos y restricciones, modificación de infraestructuras, etc.) o de implicaciones en biodiversidad, hábitat y estructura de paisaje, que dotan a este modelo de la naturaleza propia de un software integrado o aplicación vertical focalizada hacia una aplicación específica (Clarkslabs, 2006).

Otra diferencia es que ambos modelos presentan grados variados de intervención para establecer la relación entre las categorías o transiciones y las variables explicativas. La evaluación multicriterio de CA_Markov, por ejemplo, facilita la inclusión del conocimiento del experto y convierte esta herramienta en un útil complejo y sofisticado. LCM es bastante más rígido y condiciona más la transformación e inclusión de las variables. MLP funciona de manera automática, no requiriendo la intervención del usuario, aunque éste puede intervenir para modificar parámetros, parar el proceso o volver a iniciarlo. Se comprueba como los mejores resultados se obtienen modificando los valores de aprendizaje del modelo MLP de manera interactiva. Por otra parte, CA_Markov realiza una proyección de tipo lineal, mientras que MLP, en LCM, puede abordar relaciones no lineales.

De hecho, la capacidad de modelizar funciones complejas no es necesariamente una ventaja en modelización prospectiva ya que puede conducir a un sobreajuste del modelo, por lo que las condiciones pasadas utilizadas para calibrar el modelo determinarían su rendimiento. Así, por ejemplo, Mas et al (2004) encontró que las redes neuronales más complejas permitían una mejor conexión durante el período de calibración pero fallaban al predecir los cambios en el período siguiente.

Como ampliación de este apartado el autor se remite a Mas et al, (2010) donde se pueden encontrar comparativas con otros módulos o programas de simulación espacio-temporal como Dinamica y CLUE-s.

6.5. Los Gradientes de Accesibilidad Territorial en la simulación del Crecimiento Urbano de la Región de Murcia. Análisis y valoración mediante métricas e índices espaciales

Se desarrolla a continuación una experiencia realizada ahora solo con el modelo LCM en este mismo ámbito territorial, en el que se integran las variables de accesibilidad territorial (modelo descrito en el capítulo 4) como factores para la simulación del crecimiento urbano. Finalmente, se realiza un análisis de los cambios en la estructura urbana para los años 2000 y 2006, y su simulación en 2006 y 2020, mediante índices y métricas espaciales, que considera la exposición visual de este fenómeno y su localización en zonas especialmente sensibles, y permite valorar la alteración de las condiciones de fragilidad eco-paisajística de este territorio.

La región murciana, y la cuenca hidrográfica del río Segura que la enmarca, debe hacer frente a numerosos problemas como la degradación medioambiental, la escasez de agua, la intensificación de la agricultura, la expansión del regadío, la contaminación de sus cauces principales y de los acuíferos, la intensa urbanización del litoral o el turismo masificado. Estos problemas son acuciantes en las últimas décadas y están ligados a las fuertes dinámicas de transformación de usos, relacionadas, sobre todo, con la gestión del agua en sus fértiles vegas y con el fenómeno de expansión urbanística (Gómez y Grindlay, 2008). Estos hechos podrían verse agudizados si se cumplen las hipótesis del INE sobre población que cifran en un 9,2% el crecimiento demográfico relativo de la Región de Murcia para el periodo 2009-2019 y que sitúan a esta región como una de las más dinámicas desde el punto de vista demográfico.

En la actualidad, las infraestructuras de transporte constituyen los ejes vertebradores del modelo de ocupación urbana (Cheng et al. 2002 y Verburg et al. 2004) y dan lugar a profundas transformaciones territoriales y económicas en la zona de estudio. En este sentido, los tramos de autovía propuestos por la Consejería de Obras Públicas en su ETTRM (2005-2020) permiten prever profundos cambios en la evolución de la accesibilidad territorial, lo que redundará, además, en la concentra-

ción en torno a ellas de los nuevos espacios urbanos. Esta previsión de nuevas infraestructuras justifica el interés por modelizar el crecimiento urbano que puede tener lugar en la región murciana con un horizonte delimitado en el año 2020. La estructura del viario, y sus características, condicionará la accesibilidad a cada una de sus unidades territoriales, y por tanto, su potencial grado de desarrollo (Varela, 2004). En esta línea se han desarrollado numerosos trabajos, tanto a escala europea y nacional como dentro de espacios urbanos y metropolitanos (García, 2000). Se pretende contemplar, ahora, la influencia de la puesta en funcionamiento de las nuevas autovías, bajo la forma de mapas de accesibilidad territorial (Gutiérrez et al. 1999) y su variación temporal (Valenzuela et al. 2006 y Marr et al. 2007) que se denominará “Gradiente de Accesibilidad”.

Consecuencia de este fenómeno de crecimiento urbano es la alteración de la “fragilidad eco-paisajística”, concepto que aglutina tanto las características ecológicas como las visuales del paisaje. La fragilidad eco-paisajística podría definirse como el grado en que el paisaje, con sus características ecológicas y visuales, está capacitado para soportar cambios o intervenciones sin experimentar modificaciones sustanciales de su carácter. La fragilidad eco-paisajística a un tipo específico de cambio, en este caso el desarrollo urbanístico, vendría definido como las interacciones entre el paisaje como tal, la forma de percibirlo y la naturaleza particular del fenómeno analizado.

Interesa por tanto analizar cómo el crecimiento urbano (con el horizonte de 2020) afecta a las condiciones de fragilidad del paisaje y su evolución a lo largo del tiempo. Para ello, y a partir de la cartografía real de 2000 y 2006 y de la simulación para el 2006 y 2020, se caracterizan los cambios producidos en la estructura urbana para cada una de las unidades de paisaje consideradas, mediante métricas de superficie urbanizada y de exposición visual e índices de fragmentación y forma.

6.5.1. Ámbito de estudio

Se elige una zona reducida de 2270 km² de extensión (marco de 50 km x 45 km) que comprende gran parte de la vega media del río Segura, la cuenca del Mula y el valle del Guadalentín (el mismo ámbito que en la comparati-

va anterior). Esta zona es muy representativa no sólo de la riqueza paisajística existente en la región de Murcia, sino también de las fuertes dinámicas espaciales y socioeconómicas que están teniendo lugar en las últimas décadas. Se contempla aquí la influencia las nuevas autovías, que conectarán Archena con Mula y Alcantarilla, y las recientes, que partiendo de las inmediaciones de Totana y Alhama de Murcia, enlazan ya con Mazarrón y Fuente Álamo respectivamente.

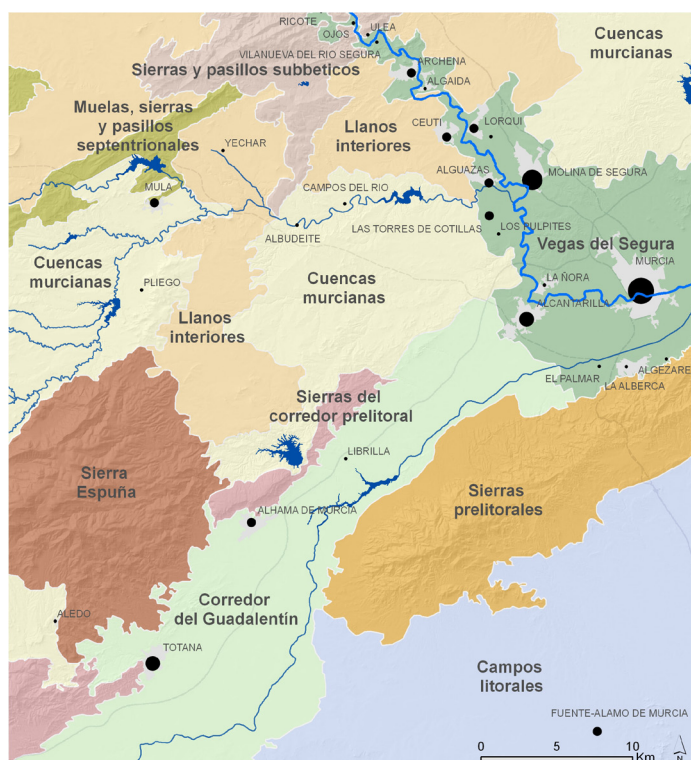
Las unidades de paisaje incluidas en este ámbito (Figura 6.15), recogidas en el Atlas de los paisajes de la Región de Murcia (AA.VV., 2009) y que se consideran más tarde son:

Muelas, sierras y pasillos septentrionales, Sierras y pasillos subbéticos, Llanos interiores del Norte y del Oeste, Cuencas murcianas del Norte, del Oeste y del Centro, Vegas del Segura, Sierra Espuña, Sierras del corredor prelitoral, Corredor del Guadalentín, Sierras prelitorales y Campos litorales.

6.5.1.1. Cartografía de partida y bases de datos.

Las fuentes cartográficas utilizadas proceden en su gran mayoría de las bases de datos generadas para un estudio anterior (Gómez y Grindlay, 2008). Esta ingente cantidad de información que fue proporcionada por la Confederación Hidrográfica de Segura (CHS), el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (CARM), es complementada con nuevos elementos procedentes del proyecto Corine Land Cover 2006, del “Atlas de los Paisajes de la Región de Murcia” (Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio, 2009), de “Los hábitats comunitarios de la Región de Murcia” a escala 1:25000 (Dirección General de Medio Ambiente), del Navegador de Carreteras de la Región de Murcia (Navecarm), del proyecto Natmur-08 de la Dirección General de Patrimonio Natural y Biodiversidad de la Región de Murcia, del Sistema de Información Territorial de la Región de Murcia (SITMURCIA) y del estudio del transporte terrestre en la región de Murcia ETTRM (2005-2020) de la Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio, en su mayoría mediante servicios WMS.

La base cartográfica más importante la constituye la base de datos de ocupación del suelo del proyecto Corine Land Cover para los años 1990 (CLC90), 2000 (I&CLC2000) y 2006 (CLC2006), basada en una nomenclatura jerárqui-



6.14. MAPA GUÍA Y UNIDADES DE PAISAJE ELABORADO A PARTIR DEL ATLAS DE LOS PAISAJES DE LA REGIÓN DE MURCIA.

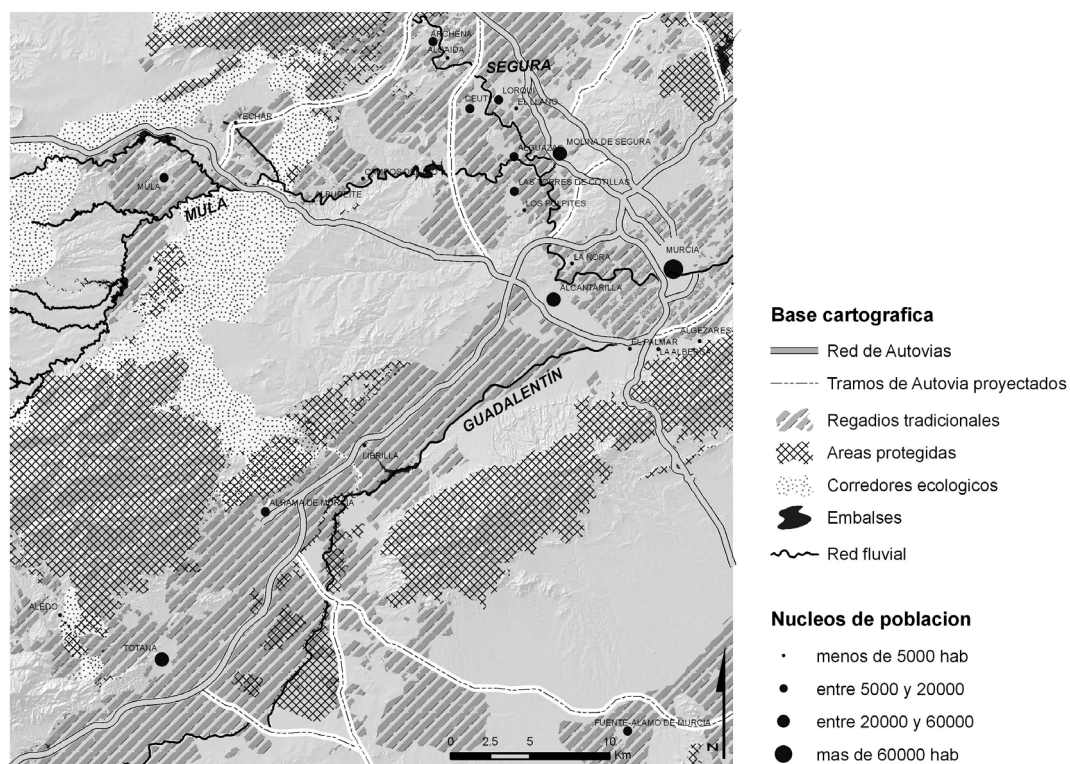


FIGURA 6.15. • BASE CARTOGRAFICA UTILIZADA

ca de 5 niveles, con tamaño mínimo de polígono de 25 has. (www.ign.es). Las series cronológicas de usos del suelo para los años 1990, 2000 y 2006 se obtienen por agrupación de las categorías de nivel 3 del proyecto Corine Land Cover. Las cartografías transformadas, las categorías originales y los 7 usos resultantes se reflejaron en la aplicación anterior.

Además se utiliza un Modelo Digital de Terreno en formato raster de 20 metros de resolución planimétrica (CHS) como base de las cartografías derivadas de pendientes, orientaciones (Figura 6.15), cuencas visuales; las capas vectoriales de la red viaria actual y futura digitalizada a partir del ETRM (2005-2020), hábitats, red de corredores ecológicos y vías pecuarias, espacios protegidos (ZEPAS, LICs, Montes Públicos del CARM con fecha de 2004), la red fluvial y los embalses (CHS, 1998), las infraestructuras hidráulicas (CHS, 1998), y las superficies de regadíos tradicionales (CHS, 2007). Las unidades de paisaje ya mencionadas son digitalizadas a partir de la georreferenciación del Atlas de los paisajes de la Región de Murcia (AA.VV., 2009).

Para la implementación en el modelo de simulación raster las capas de información han sido transformadas a este formato, siendo la resolución del pixel adoptada de 20 metros, lo que da como resultado imágenes de 2280 columnas y 2491 filas.

6.5.1.2. Dinámica de los usos del suelo. Zonas urbanas, industriales y de transporte.

El análisis diacrónico (1990, 2000 y 2006) de los principales usos del suelo ha sido ya abordado en el apartado 6.4 y en recientes publicaciones (Camacho et al., 2010 y Molero et al., 2010). Ahora el interés se centra solo en el intenso proceso de urbanización, en sentido amplio (desarrollo de zonas urbanas, industriales y de transportes), que ha tenido lugar en la Región de Murcia en general y que tiene en la zona de estudio un ejemplo representativo.

Observando la cartografía presentada (Figura 6.16) se aprecia en ella un claro avance de lo que genéricamente se ha denominado como “superficies artificiales”. La transformación espacial en el ámbito de estudio ha sido constante en las últimas décadas. Se ha calificado a este importante fenómeno de urbanización como el proceso,

quizás, que mayores cambios está introduciendo en los paisajes de la Región de Murcia en las últimas décadas (AAVV, 2009). En la obra de Gómez y Grindlay (2008), se realiza un análisis de la dinámica del suelo urbano sobre la base de ortofotografía aérea e imágenes satélite, entre otros datos.

Los factores que han estructurado el proceso de urbanización en sus distintas formas (tejido urbano continuo, explosión de un suburbano disperso con una tipología edificatoria unifamiliar bien en vivienda aislada o adosada...), así como las numerosas superficies “artificiales” ligadas a equipamientos, dotaciones comunitarias y servicios diversos requeridos por este espacio multifuncional han sido, fundamentalmente, dos: desde tiempo inmemorial, el agua, su presencia o ausencia, ha configurado profundamente este territorio y, en fechas recientes, son las nuevas y renovadas infraestructuras viarias el elemento articulador clave; desde las relativamente recientes autopistas y autovías hasta las tradicionales carreteras nacionales y comarcales, sin olvidar el peso que en este ámbito tiene la importante y singular red de caminos de huerta.

El río Segura y el Guadalentín, como principales “corredores hídricos”, conforman los ejes de poblamiento y los ejes agrícolas fundamentales. La infraestructura viaria desarrollada, que corre casi paralela a estos corredores, no ha hecho sino afianzar una urbanización dispersa y descontrolada además de favorecer la proliferación de equipamientos agroindustriales, de servicios logísticos y almacenaje que demanda la potente y vanguardista agricultura de la zona. Estamos ante unos “paisajes de transición” donde los usos rurales, urbanos e industriales se entremezclan y en donde la proliferación de nuevos viales e infraestructuras generan una “artificialidad” creciente.

En la cartografía evolutiva mostrada resaltan tres áreas donde las “zonas urbanas, industriales y de transporte” adquieren un mayor desarrollo. Destaca el sector que engloba la vega alta y media del Segura y gran parte de la huerta murciana. Tras él, se individualizan procesos urbanizadores crecientes en el “corredor del Guadalentín”, en torno a los municipios de Totana, Alhama de Murcia y Campo de Sangonera y a ambos lados de la autovía A-7 que cruza este sector. Una tercera área, junto al municipio de Fuente Álamo, destaca por su mayor accesibilidad con respecto al litoral murciano, propiciada por los nuevos viales y que está originando la aparición

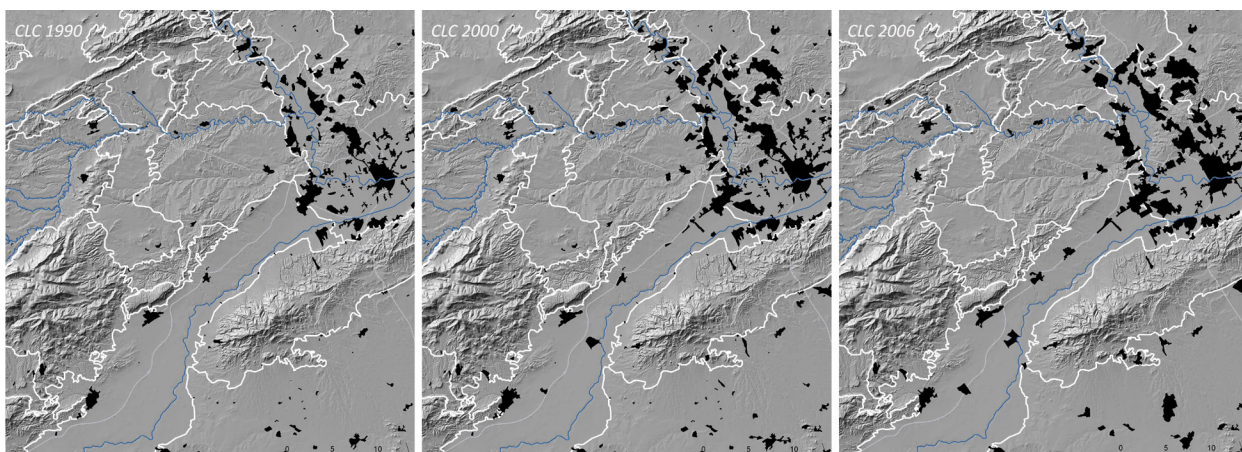


FIGURA 6.16. SERIE TEMPORAL Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ZONAS URBANAS, INDUSTRIALES Y DE TRANSPORTE (EN NEGRO). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DEL PROYECTO CORINE LAND COVER 1990, 2000 Y 2006.



FIGURA 6.17. • NUEVOS ESPACIOS AGROINDUSTRIALES Y DE SERVICIOS EN EL VALLE DEL GUADALESTÍN. FOTOS: E. MOLERO 2007

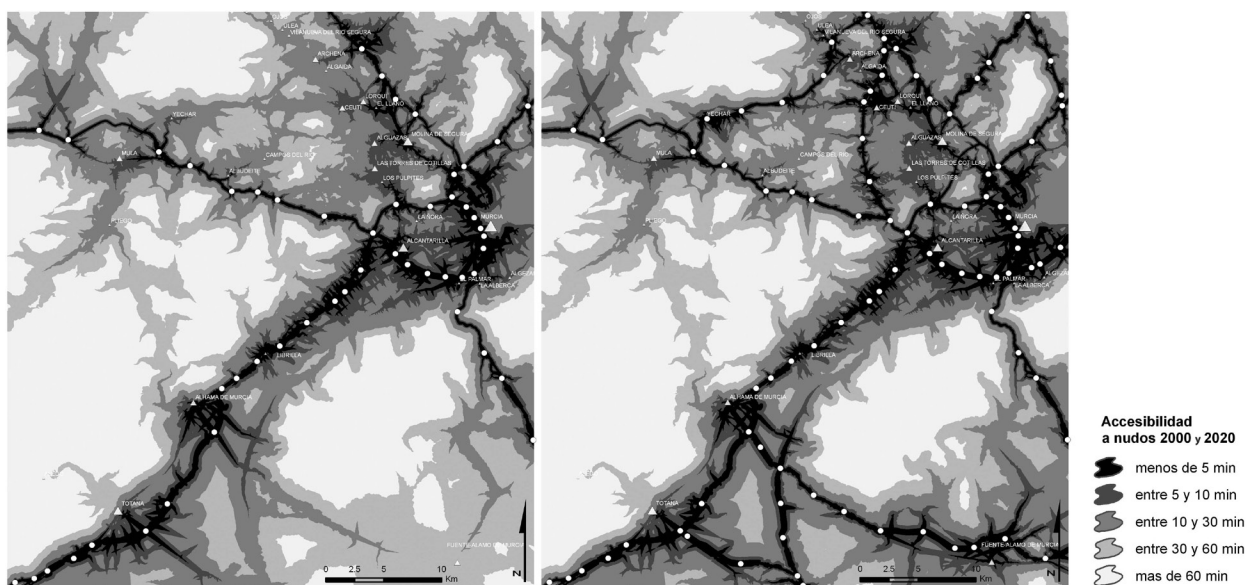


FIGURA 6.18. • ACCESIBILIDAD TERRITORIAL A NUDOS (AÑOS 2000 Y 2020).

de residenciales asociados al turismo.

Las dinámicas seguidas que han desembocado en un crecimiento espectacular, en muchos casos, de los paisajes “antropizados” han sido diversas. Los tradicionales núcleos urbanos vinculados al aprovechamiento del agua, y situados a lo largo del recorrido del río Segura y del Guadalentín, han experimentado un importante crecimiento; primero, mediante la ampliación de su casco urbano, a través de los clásicos “ensanches” con un tejido urbano compacto, para posteriormente explotar en un disperso residencial con una tipología de viviendas unifamiliares, bien aisladas o adosadas, de hondo calado visual y paisajístico. Esta expansión de la urbanización ha sido posible, además, por el desarrollo y la extensión de las redes de abastecimiento urbano de agua llevada a cabo por la Mancomunidad de Canales del Taibilla, cuyo sistema infraestructural de abastecimiento de agua ha sido considerado como un hito muy importante en la historia hidráulica española. Este crecimiento indiscriminado de la urbanización es especialmente visible en el municipio de Murcia (en su área metropolitana particularmente) donde su tradicional huerta ha sido objeto de una desenfadada urbanización.

6.5.2. Objetivos

- Definir los factores y restricciones del crecimiento urbano, en particular la incidencia de la accesibilidad territorial como variable que puede integrar el complejo papel de las infraestructuras de transporte en la transformación territorial.
- Simular el crecimiento urbano de un área representativa de la Región de Murcia en 2020 (a partir de la cartografía de 2000 y 2006), teniendo en cuenta la previsión de los nuevos tramos de autovía.
- Comparar la simulación de 2006 con la cartografía real, y valorar el resultado para establecer la validez del modelo de simulación.
- Enriquecer los análisis de fragilidad paisajística combinando los conceptos de fragilidad paisajística y fragilidad ecológica.
- Explorar las consecuencias que tiene el crecimiento urbano en la fragilidad eco-paisajística y visual, comparando la situación de partida (año 2000) con el escenario generado para el 2020.

6.5.3. Metodología

6.5.3.1. Factores y restricciones del crecimiento urbano.

La elección de las variables que mejor puedan caracterizar la ubicación del crecimiento urbano es uno de los principales puntos de interés en los trabajos recientes que abordan esta problemática. Una revisión bibliográfica sobre los distintos modelos predictivos y las variables utilizadas en cada caso se puede consultar en Pérez et al. (2004). En este caso, para la simulación de la localización de nuevos usos residenciales, industriales y comerciales en aquellos lugares con vocación o aptitud para este tipo de actividad, se tendrán en cuenta restricciones y factores de distinta naturaleza y justificados en el apartado 6.5.1.2, como la restricción ligada a la ubicación de espacios protegidos y dominios públicos viarios e hidráulicos, o, como factores, las variables topográficas o la distancia a canales de abastecimiento urbano (en concreto a los Canales del Taibilla), que, en el área de trabajo, y como se ha comentado anteriormente, ha supuesto un claro impulso para la expansión de la urbanización.

A dichos factores se les ha añadido la inclusión de dos modelos de accesibilidad territorial expuestos en el capítulo 4.

- Accesibilidad territorial a nudos.

Se utiliza en esta modelización la accesibilidad territorial en términos de tiempo en alcanzar el nudo más cercano de una vía de gran capacidad. Se estima que en ese momento nos encontramos “conectados” a la red. Los objetivos por tanto son tomados sobre los nudos de las autovías A-7, A-30, MU-30, RM-2, RM-3 y RM-15 tanto en el estado actual como en el futuro, una vez insertados los tramos de autovía propuestos por la Consejería de Obras Públicas en su ETTRM (2005-2020), tal y como se aprecia en la figura 6.18.

- Accesibilidad territorial a núcleos.

La accesibilidad a entornos urbanos ya consolidados expresa la mayor aptitud de las zonas contiguas o cercanas a ámbitos ya urbanizados que aquellas que se encuentran desprovistas de infraestructuras de abastecimiento, saneamiento, energía eléctrica...

Se modeliza de igual forma sobre la superficie de fricción pero en este caso tomando como objetivos los centroides de los núcleos urbanos ya existentes. Se realizan igualmente dos modelizaciones una para el año 2000 y otra para el 2020 (figura 6.19).

Se obtienen mediante sustracción (álgebra de mapas) los “gradientes de accesibilidad territorial” (a nudos y a núcleos) como variación o ganancia en términos de tiempo (minutos) que propician las nuevas infraestructuras (Figura 6.20 y Tabla 6.2). Experiencias similares pueden consultarse en Marr et al. 2007 para la región de Michoacán, Méjico o en Gutiérrez et al. 1999 en Madrid. En resumen, las restricciones y factores utilizados para simular el crecimiento urbano en 2006 y en 2020, en sintonía con los trabajos de Gómez et al. (2008), Molero et al. (2007 y 2010) y Camacho et al. (2010), han sido los siguientes:

Restricciones:

- Espacios protegidos (ZEPAS, LICs, Montes Públicos)
- Dominio público hidráulico (100m a embalses y red fluvial)
- Dominio público viario (50 m a las autopistas en 2000 y previsión en 2020)

Factores:

- Modelo digital de terreno (hipsometría)
- Mapa de pendientes (clinometría)
- Mapa de Orientaciones
- Distancia a los canales del Taibilla
- Accesibilidad territorial a núcleos (situación en 2000 y previsión en 2020)
- Accesibilidad territorial a nudos (situación en 2000 y previsión en 2020)

6.5.3.2. Simulación del crecimiento urbano.

Para la simulación de los usos urbanos en 2006 y 2020 se ha elegido el módulo Land Change Modeler (LCM) ya presentado. Este módulo integra tanto el análisis de los datos, especialmente la noción de cambios de ocupación / usos del suelo (Pontius et al., 2004), la modelización propiamente dicha y las aplicaciones anexas en materia de ecología del paisaje y biodiversidad, así como implicaciones de la ordenación y gestión territorial.

La modelización espacio-temporal prospectiva está dividida en dos fases: la de la elaboración de los modelos

de potencial de transición entre dos fechas (t_0 y t_1) y la de la puesta en práctica de la predicción y/o obtención de escenarios (T). Una descripción exhaustiva de la puesta en práctica de LCM puede encontrarse en Aguedad y Houet (2008) y en Dang Khoi y Murayama (2010).

• Evaluación del potencial de cambio: el potencial de transición.

Como se ha visto anteriormente LCM aborda la simulación prospectiva teniendo en cuenta el potencial de transición entre las categorías, que son seleccionadas por el objetivo de la modelización (simulación de una categoría o grupo de categorías en particular), por eliminación de las transiciones con poca superficie en el conjunto de la imagen, o bien por la mayor o menor probabilidad de que las transiciones tengan lugar en la fase de simulación (periodo transcurrido entre la cartografía más reciente de la fase de calibración y la fecha de simulación proyectada).

Cada transición elegida es caracterizada por variables explicativas. Estos « drivers » son transformados teniendo en cuenta ya sea el modelo de evaluación que apliquemos posteriormente a cada transición (por ejemplo, la regresión logística múltiple exige una transformación lineal de las variables respecto al potencial de transición) o la naturaleza de la variable. El potencial de transición, por sub-modelo, es a continuación evaluado por regresión logística múltiple o por redes neuronales (Multi-Layer Perceptron, MLP).

• Cantidad y localización del cambio: cadenas de Markov La cantidad de cambio estimado es obtenida a partir de una matriz markoviana (método probabilístico), que calcula las áreas (número de píxeles) y las probabilidades de transición entre dos mapas de ocupación/ usos del suelo. Estos mapas (t_0 y t_1), que constituyen los datos de la fase de calibración, son el punto de partida para proyectar los cambios estimados en una fecha posterior (T).

Una vez calculada la cantidad de cambio estimado, cerca de 8500 has., la localización de dichos cambios es un segundo proceso que, en LCM, se basa en la elección de aquellos píxeles más aptos o de mayor potencial de cambio. Un algoritmo de evaluación multiobjetivo (MOLA) soluciona los problemas de incompatibilidad entre usos o transiciones distintos y un módulo interno de

Idrisi (CHGALLOC), determina las categorías que ganan y aquéllas que pierden superficie para, por último, localizar los cambios en las áreas de mayor potencial según los mapas obtenidos tras aplicar MLP.

- Otras opciones: Inclusión de restricciones, variables dinámicas, etc.

LCM permite que la simulación sea un proceso dinámico, al recalcular en cada paso temporal (simulación discreta) ciertas condiciones como la modificación de la red viaria, las distancias de unas categorías respecto a otras, o incluso la inserción en la fase de predicción de eventos futuros planificados o previstos (zonas de protección, figuras de planeamiento). LCM, por tanto, permite explicitar los cambios que van a producirse en ciertas variables. La inclusión de las restricciones e incentivos es, por otra parte, una opción más de la fase de predicción, pudiendo aplicarse a cada transición de manera individual o a grupos de ellas.

6.5.3.3. Fragilidad eco-paisajística y visual.

Entre las metodologías de evaluación de paisaje que mayor repercusión han tenido en Europa, el Landscape Character Assessment (evaluación del carácter paisajístico, LCA), el enfoque metodológico desarrollado por la Countryside Commission durante la última década, ha prestado una atención especial a la evaluación de la fragilidad paisajística, ampliamente experimentada en Inglaterra y Escocia. La Countryside Commission define la vulnerabilidad o fragilidad paisajística como la significación o importancia de los atributos o componentes que explican el carácter paisajístico de un determinado ámbito (o de sus tres aspectos: visuales, culturales y ecológicos) en relación con la probabilidad de su pérdida o desaparición (Swanwick, 2003). En la metodología británica se diferencia entre la “fragilidad de paisaje general” (overall landscape sensitivity) y la “fragilidad paisajística a un tipo específico de cambio” (landscape sensitivity to a specific type of change) que puede ser definida como “las interacciones entre el paisaje como tal, la forma de percibirlo, y la naturaleza particular del cambio o desarrollo en cuestión”.

En España, tal y como apuntan los autores del Atlas de los paisajes de la Región de Murcia (AA.VV., 2009), en los proyectos de ordenación del paisaje el uso de la noción de “fragilidad” y los métodos para su estimación se han

asociado a los enfoques muy visuales (“vulnerabilidad visual” o “fragilidad visual del paisaje”). En estos estudios generalmente no se presta atención a la fragilidad ecológica (ecological o environmental sensitivity), aunque esta noción esté ampliamente utilizada en ecología y ecología del paisaje en particular.

No hay acuerdo generalizado sobre la definición de fragilidad ecológica y los métodos explícitos de su determinación cuantitativa. La fragilidad ecológica del paisaje es, en su sentido más simple, la probabilidad de que en el futuro sus condiciones ecológicas se deteriore (Buckley, 1991; Burel et al., 2002). Para no confundir el concepto que se emplea con el de fragilidad visual de paisaje, se utiliza en este estudio el término “fragilidad eco-paisajística” que aglutina tanto las características ecológicas como las visuales del paisaje. Así, nos aproximamos a la fragilidad eco-paisajística como al grado en que el paisaje, con sus características ecológicas y visuales, está capacitado para soportar cambios o intervenciones sin experimentar modificaciones sustanciales de su carácter.

Por otra parte, nos centramos en la fragilidad eco-paisajística a un tipo específico de cambio, definiéndola como las interacciones entre el paisaje como tal, la forma de percibirlo y la naturaleza particular del desarrollo urbanístico. Los impactos en el paisaje y en sus ecosistemas propiciados por este desenfundado fenómeno en sus diferentes modalidades, su mayor fragmentación y el consiguiente aumento en la fragilidad, así como un amplio listado de referencias y un interesante modelo conceptual pueden consultarse en Alberti (2005) y en Santos et al. (2006).

Las herramientas utilizadas para el análisis y evaluación de estos conceptos, basadas en reclasificaciones, superposiciones y algoritmos de cálculo sobre modelos digitales de elevaciones y superficies de fricción son comunes a cualquier Sistema de Información Geográfica, siendo las métricas e índices de fragmentación tratadas por software más específicos, r.e para GRASS (Baker y Cai, 1992), LEAP II (Perera et al. 1997), RULE (Gardner, 1999), ATtiLA (Ebert y Wade, 2000), Fragstats 3.3 (McGarigal et al., 2002) o LCap (Theobald, 2007).

Este trabajo se realiza bajo el entorno de ArcGIS 9.3.1, su módulo Spatial Analyst, empleado para el análisis

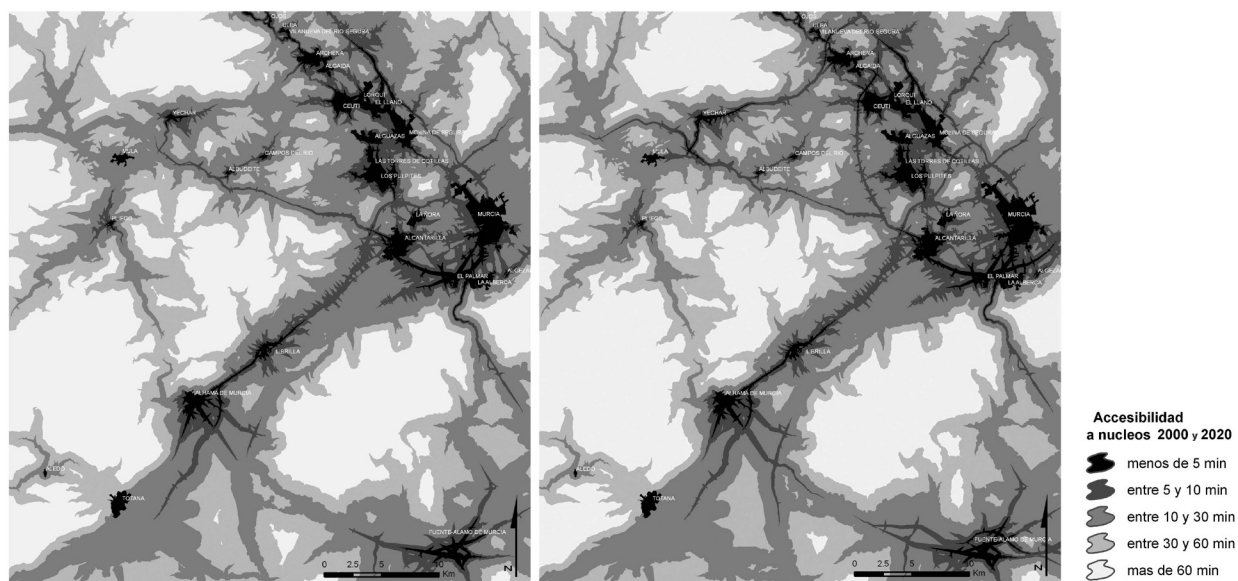


FIGURA 6.19. • ACCESIBILIDAD TERRITORIAL A NUCLEOS (ACTUAL Y FUTURO)

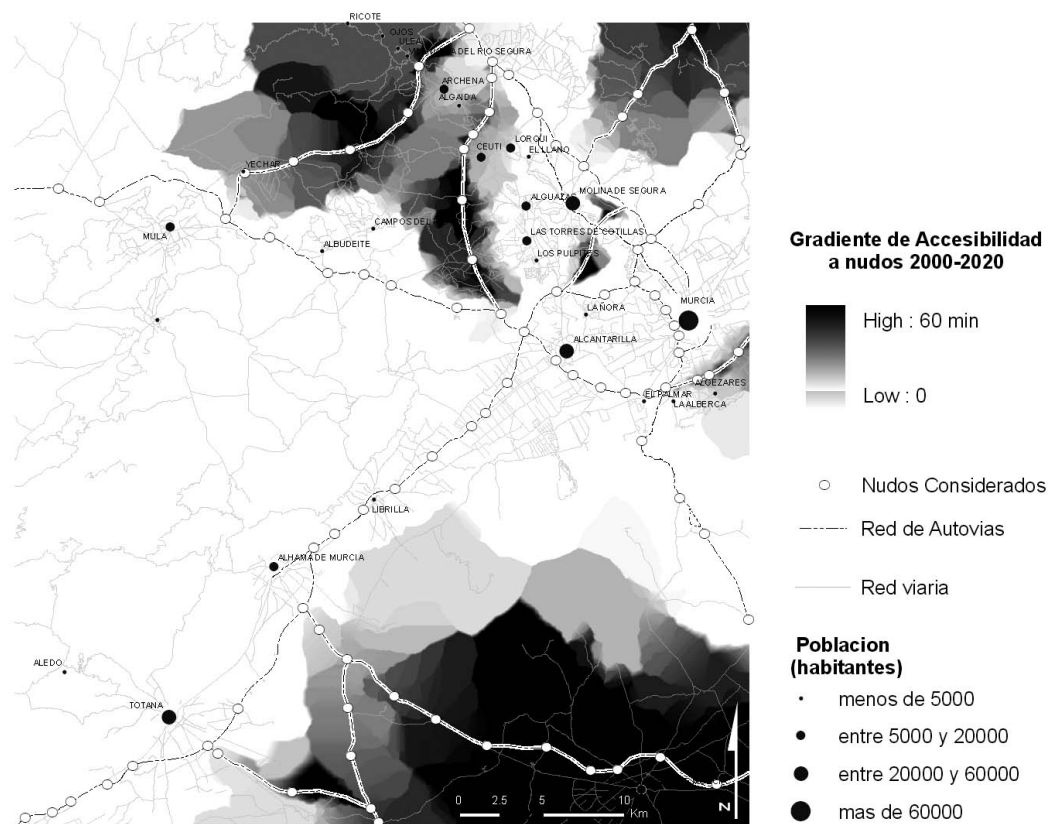


FIGURA 6.20. • GRADIENTES DE ACCESIBILIDAD TERRITORIAL

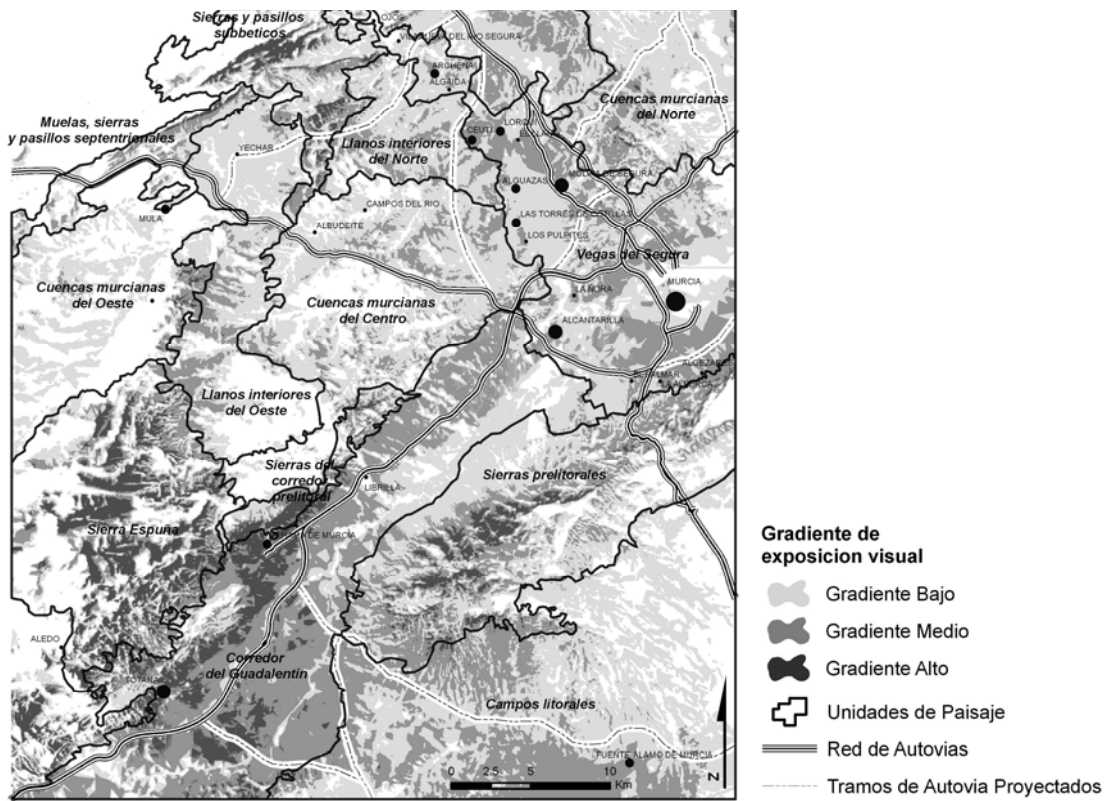


FIGURA 6.21. • GRADIENTE DE EXPOSICIÓN VISUAL PARA EL PERIODO 2000-2020

UNIDAD	Urban%			NumP			MPS			PSSD			MSI			AWMPFD			ED		
	00	06	20s	00	06	20s	00	06	20s	00	06	20s	00	06	20s	00	06	20s	00	06	20s
Muelas, s. y pas. sep.	1,30	2,25	2,24	2	3	3	23,1	26,7	26,6	8,3	8,2	8,2	1,80	1,62	1,60	1,27	1,47	1,26	0,5	1,0	1,0
S. y pasillos sub.	0,00	0,00	0,03	0	0	3	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	1,0	0,00	0,00	1,69			1,42	0,0	0,0	6,2
Llanos int. Norte	3,00	3,43	10,25	7	7	28	25,3	28,8	21,5	14,1	15,7	48,0	1,94	1,90	1,62	1,30	1,28	1,32	1,9	1,1	1,1
C. murcianas Norte	11,98	14,66	18,21	11	14	34	107,0	102,9	52,6	163,0	186,9	171,6	1,47	1,43	1,51	1,26	1,23	1,30	4,6	0,4	0,6
C. murcianas Oeste	1,37	1,84	1,86	8	7	7	23,8	36,4	36,7	26,7	56,4	56,9	1,52	1,59	1,52	1,29	1,30	1,29	1,7	0,9	0,8
Llanos int. Oeste	0,62	0,63	0,64	7	7	8	11,5	11,6	10,3	12,9	13,3	13,1	1,29	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26	0,8	1,2	1,2
C. murcianas Centro	2,61	3,17	4,78	14	12	48	36,5	51,7	19,5	25,0	63,5	65,6	1,49	1,56	1,52	1,26	1,28	1,32	3,7	0,8	1,0
Vegas del Segura	29,02	34,67	44,89	88	76	94	74,8	103,5	108,4	225,0	299,0	643,5	1,66	1,68	1,65	1,29	1,29	1,36	32,8	0,5	0,5
Sierra Espuña	0,51	0,52	0,52	11	11	11	8,9	9,0	9,1	18,0	18,5	18,5	1,52	1,53	1,50	1,27	1,27	1,27	1,1	1,3	1,3
S. del corredor prelit.	0,03	0,03	0,03	1	2	2	0,7	0,4	0,4	0,0	0,3	0,3	1,27	1,25	1,24	1,34	1,34	1,34	0,0	6,0	5,9
Cor. del Guadalentín	4,38	5,87	9,87	30	31	66	46,1	59,8	47,2	75,5	88,9	152,8	1,56	1,56	1,56	1,27	1,26	1,32	8,3	0,6	0,7
Sierras prelitorales	0,83	1,40	1,63	22	26	29	8,4	12,0	12,5	12,2	20,4	20,5	1,52	1,51	1,49	1,28	1,28	1,30	2,4	1,2	1,3
Campos litorales	3,33	5,08	7,41	42	50	74	27,0	34,7	34,2	40,1	66,5	73,5	1,48	1,49	1,55	1,28	1,26	1,27	9,0	0,7	0,8

TABLA 6.3 • INDICADORES DE FORMA Y FRAGMENTACION PARA CADA UNIDAD DE PAISAJE.

UNIDAD	Sup. Unid Has	Urban%		NumP		MPS		PSSD		AWMPFD		MSI		ED	
		2006	2006s	2006	2006s	2006	2006s	2006	2006s	2006	2006s	2006	2006s	2006	2006s
Muelas, s. y pas. sep.	3560,2	2,2	1,3	3	2	26,7	22,8	8,2	8,6	1,47	1,27	1,6	1,7	1,0	1,2
S. y pasillos sub.	7524,5	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
Llanos int. Norte	5884,8	3,4	4,5	7	12	28,8	20,7	15,7	22,2	1,28	1,32	1,9	1,9	1,1	1,3
C. murcianas Norte	9822,3	14,7	12,7	14	21	102,9	58,4	186,9	129,4	1,23	1,26	1,4	1,5	0,4	0,5
C. murcianas Oeste	13845,5	1,8	1,4	7	7	36,4	26,9	56,4	27,1	1,30	1,28	1,6	1,5	0,9	1,0
Llanos int. Oeste	12933,4	0,6	0,6	7	7	11,6	11,4	13,3	13,0	1,26	1,26	1,3	1,2	1,2	1,2
C. murcianas Centro	19578,1	3,2	3,4	12	19	51,7	34,0	63,5	63,4	1,28	1,28	1,6	1,4	0,8	0,8
Vegas del Segura	22694,8	34,7	34,8	76	120	103,5	65,1	299,0	257,8	1,29	1,31	1,7	1,7	0,5	0,6
Sierra Espuña	19170,9	0,5	0,5	11	7	9,0	13,4	18,5	21,1	1,27	1,26	1,5	1,5	1,3	1,2
S. del corredor prelit.	2348,9	0,0	0,0	2	1	0,4	0,5	0,3	0,0	1,34	1,34	1,2	1,2	6,0	5,9
Cor. del Guadalentín	31568,7	5,9	6,8	31	65	59,8	32,1	88,9	113,2	1,26	1,31	1,6	1,6	0,6	0,8
Sierras prelitorales	22225,2	1,4	1,0	26	31	12,0	6,6	20,4	10,6	1,28	1,28	1,5	1,6	1,2	1,7
Campos litorales	34152,4	5,1	3,3	50	41	34,7	27,5	66,5	40,4	1,26	1,27	1,5	1,4	0,7	0,9

TABLA 6.4. • INDICADORES DE FORMA Y FRAGMENTACIÓN PARA EL USO URBANO DEL 2006 (REAL Y SIMULADO)

de la accesibilidad territorial y exposición visual, y su extensión Patch Analyst 4 (Rempel, 2010), basada en Fragstats, para las métricas e índices de forma y fragmentación.

• Métricas de Fragilidad eco-paisajística:

No existen un conjunto de métricas aceptadas como standard para el análisis de la dinámica urbanizadora, variando en función de los objetivos y las características específicas de los paisajes urbanos estudiados (Parker et al, 2003), si bien los trabajos de McGarigal et al. (2002), y más recientemente, Aguilera (2008), Wu (2008) o Buyantuyev et al. (2009) confirman la aplicabilidad de ciertas métricas contenidas en softwares de dominio público como Fragstats 3.3 de la Universidad de Massachusetts (ver McGarigal et al, 2002).

Gran parte de estas métricas se implementan en la extensión Patch Analyst 4 para ArcGIS 9.3.1, eligiendo el modelo vectorial a base de polígonos, por ser el originario de las capas de partida (se realiza un proceso de filtrado y homogeneización de las manchas obtenidas en la simulación previo a su conversión a polígonos), un nivel de agregación de clase (únicamente el uso denominado zonas urbanas, industriales y de transporte) y tomando como regiones independientes las unidades de paisaje ya citadas. Siguiendo los trabajos de Herold et al. 2005, Aguilera 2008, Buyantuyev et al. 2009 y Wu et al. 2010, se aplican a diferentes escenarios temporales (2000, 2006, 2006 simulado y 2020 simulado) los siguientes indicadores (Tabla 6.3):

• Urban%: Área de Suelo urbano en términos porcentuales referidos al total de la unidad de paisaje. Indica el grado de ocupación del fenómeno urbano sobre el total de usos.

• Patch Number (NumP o NP): Representa el número de fragmentos o manchas individuales del uso urbano para cada unidad. Da una idea de la medida en que el suelo urbanizado está dividido o fragmentado.

• Medium patch size (MPS o AREA MN): Tamaño medio de fragmento. Media aritmética de las áreas de los fragmentos o elementos urbanos en cada unidad. (Unidad: Has.).

• Patch Size Standard deviation (PSSD): Desviación típica

de de los tamaños de fragmento. (Unidad: Has.)

• Mean Shape Index (MSI o SHAPE MN): Índice de forma medio. Expresa la relación entre el perímetro de cada fragmento y el del fragmento más compacto. (McGarigal y Marks, 1994). No es sensible al tamaño de fragmento y toma valores superiores a 1.

• Area-Weighted Mean Patch Fractal Dimension (AWMPFD): Dimensión fractal (perímetro/área) media. Expresa la media de la complejidad de cada fragmento. Su rango varía entre 1 y 2.

• Edge density (ED): Densidad de bordes. Equivale a la suma de las longitudes del perímetro de todos los fragmentos por unidad de superficie. (unidad: m/ha)

La aplicabilidad de estas métricas, experiencias realizadas sobre diversas áreas metropolitanas y las limitaciones y errores en el manejo de estos instrumentos quedan ampliamente recogidos en Matteucci et al. (2005) y en Aguilera (2008, 2010).

Los índices generados para el escenario real del 2006 y para su correspondiente simulado permiten comparar las distintas morfologías de crecimiento urbano y ayudar en el proceso de validación (Tabla 6.4).

Paralelamente se realizan métricas de superficie edificada actual y simulada para cada unidad sobre ámbitos próximos a zonas sensibles como la red hidrográfica y los embalses (bufferes de 100 m.) y sobre espacios ocupados por regadíos tradicionales, anotando también para cada ámbito la superficie ocupada tanto por corredores ecológicos como por espacios protegidos (Tabla 6.5).

• Métricas de Fragilidad visual:

El concepto de "conectividad visual" y su utilidad en los procesos de planificación territorial referido ya en Fisher (1996) es relativamente nuevo en el campo del análisis cartográfico, favorecido por la potente tecnología SIG y los cada vez más precisos y accesibles modelos digitales de elevaciones. De su funcionamiento y aplicabilidad sobre distintos modelos y de los algoritmos utilizados da buena cuenta De Floriani et al. (1993 y 2003) y como experiencias reales en el proceso de la planificación territorial destacar los trabajos de Zahonero (2008)

para delimitar los paisajes de excelencia de las comarcas gerundenses.

Una cuenca visual identifica todos los puntos del territorio que son visibles desde al menos una celda. Un paso más allá en lo que se refiere a la conectividad visual sería la “exposición visual” referente al mismo concepto sólo que sumando el número de veces que cada celda es vista por el total de las celdas de observación. Mediante una simple resta algebraica es posible obtener la variación de esta exposición, a la que denominamos “gradiente de exposición visual”, que permite identificar las nuevas zonas visualmente accesibles y aquéllas que aumentan su exposición, y que, por lo tanto, podrían variar sus condiciones de fragilidad. Así, valores altos de este gradiente indicarán una mayor vulnerabilidad o fragilidad visual inducida.

Para este ámbito, una vez insertados los tramos de autovía propuestos por la Consejería de Obras Públicas en su ETTRM (2005-2020), se trazan visuales desde puntos situados sobre la red de alta capacidad actual y futura, separados 5 km, y desde ciertas intersecciones y nudos de especial importancia. La profundidad máxima o umbral visual adoptado es de 10 km, acorde con los trabajos de Shang et al. (2000) y con las experiencias analizadas por Grijota et al. (2010).

Los resultados de estas métricas y el gradiente de exposición visual para cada una de las unidades de paisaje se observan en la tabla 6.6 y en la figura 6.23. Las nuevas superficies urbanizadas son caracterizadas según su gradiente de exposición visual, identificando en términos absolutos y relativos las áreas localizadas sobre los espacios visualmente más vulnerables.

• Valoración

Para la valoración de los escenarios de fragilidad eco-paisajística se realiza un doble análisis. Uno de tipo vertical o temporal, en la que se interpretan los resultados numéricos de los índices (incrementos y estabilidades) para cada unidad de paisaje, tanto a nivel absoluto como porcentual, en los escenarios temporales de 2000, 2006 y 2020, y otro horizontal en el que se espacializan estos valores, comparando las diferentes regiones. En ambos análisis se integran las métricas de superficie urbana sobre áreas sensibles y su gradiente de exposición visual que permitirán caracterizar los cambios inducidos y

valorar la fragilidad eco-paisajística relacionada con el crecimiento urbano en 2006 y su simulación para el 2020

6.5.4. Resultados.

6.5.4.1. Simulación del crecimiento urbano en 2006 y 2020.

• Simulación del crecimiento urbano en 2006

A partir de los mapas binarios de 1990 y 2000 extraídos de la cartografía del proyecto Corine Land Cover, se ha modelizado la transición desde “zonas no urbanas” a “zonas urbanas, industriales y de transporte”. Las variables explicativas han sido transformadas según el algoritmo de máxima verosimilitud, que relaciona las categorías de la variable y las áreas que cambian o no en el mapa de transición. Los índices Cramer’s V entre las variables transformadas y la distribución de la categoría de uso urbano de la fecha más reciente (2000) son significativos (entre 0.1279 del factor pendientes y 0.3496 del factor altitudinal). Si bien un alto índice Cramer’s V no garantiza una buena modelización, un bajo índice sí es un indicativo de la conveniencia de no incluir en el sub-modelo la variable transformada (Clarkslabs, 2006).

El modelo Multi-Layer Perceptron (MLP) permite obtener el mapa de potencial de transición, que es la plasmación espacio-temporal del potencial de cambio. Aunque el modelo trabaja con todos los parámetros que el usuario ha introducido, LCM aplica una máscara para obtener un resultado más acorde con la realidad.

La Cadena de Markov estima la cantidad de cambio para 2006 y la localización de dicho cambio se efectúa gracias a la evaluación multiobjetivo. Es en esta fase en la que se incluyen las restricciones mencionadas en el apartado anterior. El resultado es una simulación (hard) para 2006, que es el escenario previsto para la categoría de “zonas urbanas, industriales y de transporte” en dicha fecha.

• Comparación de la simulación con el mapa real de 2006.

Los posibles criterios que permiten medir la similitud entre dos mapas para establecer la validez de un modelo de simulación son tratados con detalle en Pascual et al. (2010). En esta línea se realiza 3 comparaciones, una basada en la localización, considerando solamente el

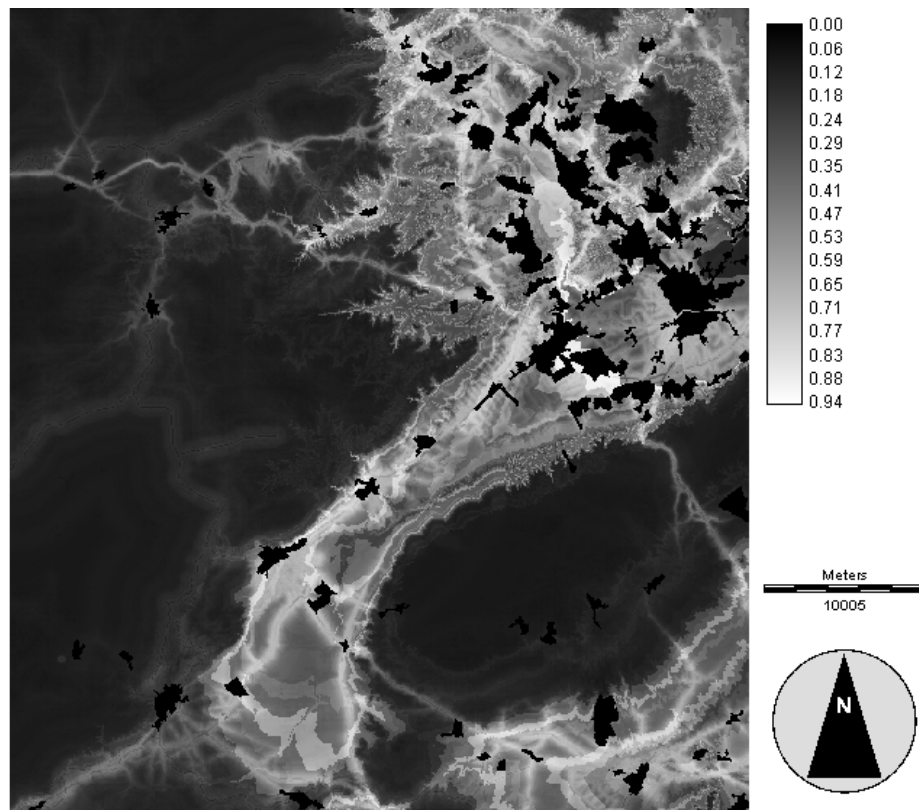


FIGURA 6.22. • MAPA DE POTENCIAL DE TRANSICIÓN A ZONAS URBANAS, INDUSTRIALES Y DE TRANSPORTE (2000-2006).

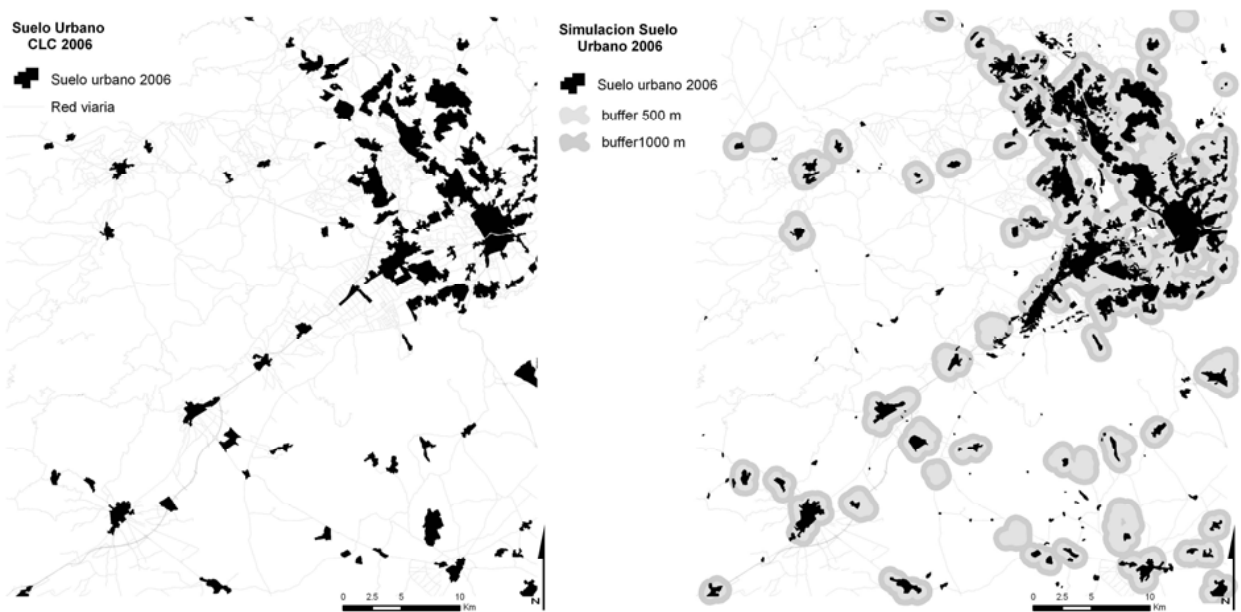


FIGURA 6.23. • SUELO URBANO REAL (CLC 2006) Y SUELO URBANO SIMULADO PARA 2006

nuevo uso urbano generado, otra considerando la localización aproximada utilizando bufferes de 500 y 1000 m alrededor de la superficie de crecimiento real y por último analizando las estructuras formales de ambos escenarios utilizando los índices de forma y fragmentación. Mediante distintas operaciones de superposición entre las cartografías simuladas (mapa de potencial de transición obtenido por MLP y mapa de usos del suelo) y entre éstas y el mapa real de usos para el año 2006, es posible detectar los ajustes y desajustes entre las áreas generadas y las reales.

La figura 6.22 muestra las áreas que se transforman en zonas urbanas, resaltadas en negro sobre el potencial de transición como fondo de la imagen, con valores que oscilan de 0 a 1. Se observa un buen ajuste “visual” entre ambos mapas, destacando que la mayor parte de los polígonos de cambio real se encuentran sobre la superficie de mayor potencial.

Por otra parte, la comparativa del crecimiento real de 2006 y la simulación de la misma fecha (Figura 6.23) permite confirmar un relativo buen ajuste de ambas cartografías. Si bien la coincidencia exacta entre el crecimiento real y el simulado es escasa, un 7% (208 has sobre las 2950 has reales), para bufferes de 500 y 1000 m los niveles de acierto o de coincidencia suben considerablemente hasta un 55,5% (1637 has) y un 74,3% (2193 has) respectivamente, lo que permite afirmar que la simulación reproduce correctamente la realidad.

Comparando los índices de forma y fragmentación obtenidos (Tabla 6.4), revelan como el grado de ocupación del fenómeno urbano sobre el total de usos es muy similar, si bien se observan ciertas desviaciones en los Campos litorales y el Corredor del Guadalentín. La estructura formal de ambos también difiere ligeramente: se produce una mayor fragmentación en el escenario estimado, como así lo sugiere el aumento en el número de fragmentos simulados (NumP), sobre todo en las unidades más dinámicas, junto a los valores más reducidos del índice de fragmentación MPS, que indica el menor tamaño de los fragmentos. Esta variación podría ser explicable por la resolución del modelo simulado y por la mínima unidad cartografiada del CLC2006. El comportamiento de los índices AWMPFD, MSI y ED para ambos escenarios resulta muy similar en prácticamente la totalidad de las regiones o unidades de paisaje lo que indica que, en general, no existen diferencias apreciables en la compleji-

dad de los fragmentos reales y los simulados.

• Simulación del crecimiento urbano en 2020

Los mapas binarios (zonas no urbanas – zonas urbanas) de 2000 y 2006 constituyen, en este caso, los dos estados temporales utilizados para la simulación de 2020. Los factores se han actualizado con la inclusión de los mapas de accesibilidad para dicha fecha. Asimismo, la restricción relativa al dominio público viario procede de la cartografía de autovías prevista para 2020, siendo incorporada en la fase de predicción. Los resultados son el mapa de potencial de transición a las zonas urbanas, industriales y de transporte y la simulación de dicha categoría para 2020 (Figura 6.24).

6.5.4.2. Fragilidad eco-paisajística.

Además de las cartografías resultantes que reflejan la fragilidad eco-paisajística relacionada con el crecimiento urbano en el periodo 2000-2020, se exponen en este apartado los resultados de la valoración mediante métricas e índices espaciales de forma y fragmentación.

• Análisis Vertical:

El NumP muestra una importante transformación en el número de fragmentos, aumentando sobre todo en las unidades con más presencia urbana (Urban% > 5). En las Vegas del Segura, Campos litorales y Corredor del Guadalentín, la variación del índice MPS es poco apreciable, lo que no sugiere un crecimiento compacto. Esto podría justificarse por la influencia del factor accesibilidad a nudos y la existencia de potentes vías de alta capacidad. El considerable aumento del índice PSSD en estas unidades indica la mayor dispersión en cuanto a tamaños de fragmento que podría explicarse por el tamaño mínimo de fragmento de la cartografía original. El incremento del MPS, en las Vegas del Segura, supone la agregación de múltiples fragmentos que se encontraban muy cercanos y que se muestra de forma muy evidente a lo largo de la A-30 paralela al cauce del Segura. Esto podría explicarse por la influencia del factor accesibilidad a núcleos junto a la accesibilidad que les confieren las infraestructuras de comunicación. Incrementos del NumP junto a disminuciones en el MPS observados en las unidades de las cuencas murcianas y llanos interiores del norte confirman un incremento de la fragmentación que se ve agravado en el primer caso por la afección de la vía proyectada de Archena a Mula a un importante corredor eco-

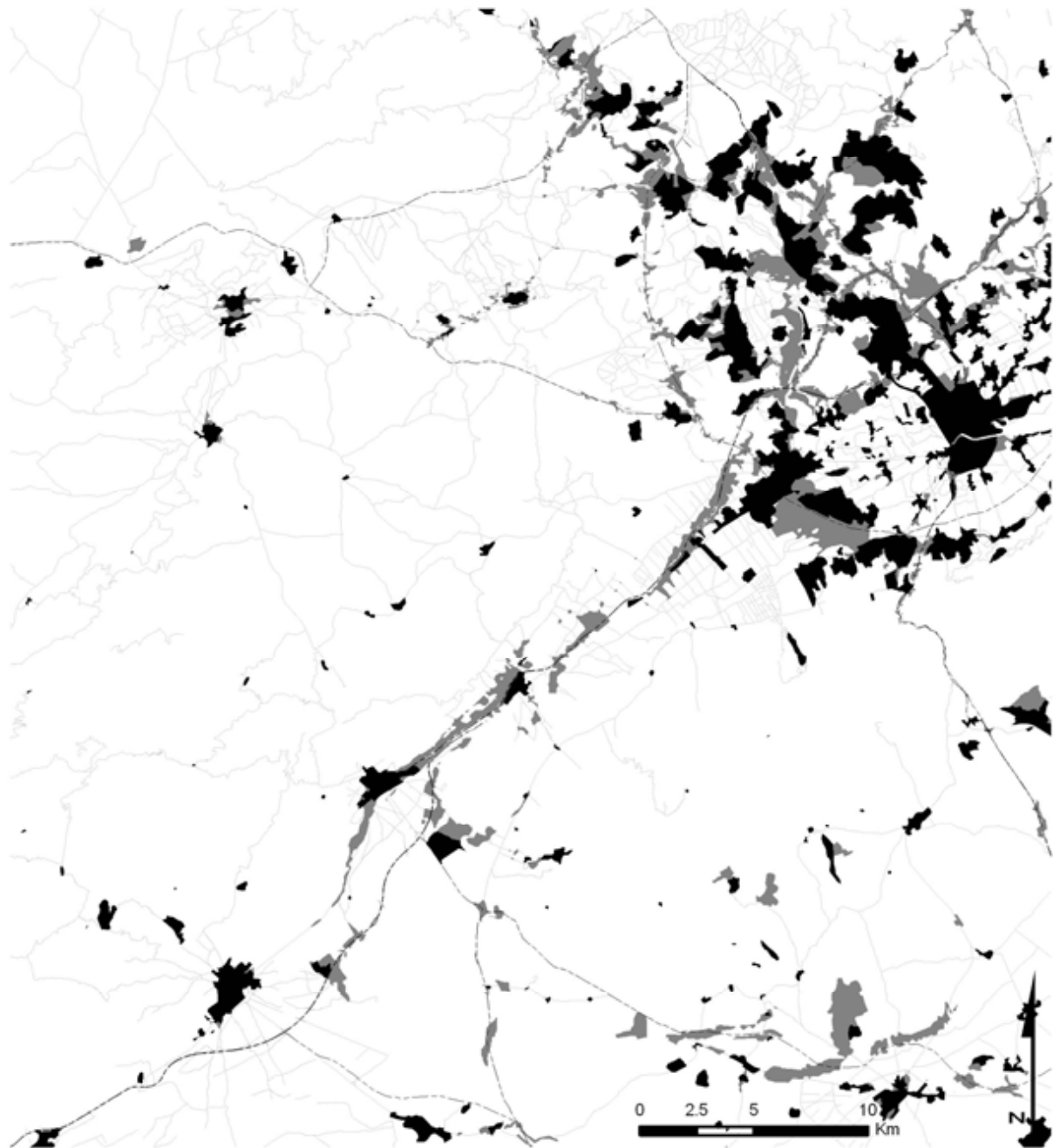





FIGURA 6.24. • SUELO URBANO REAL (CLC 2006) Y SUELO URBANO SIMULADO PARA 2020

Evolucion del Suelo Urbano 2000/2020

-  Suelo urbano 2000
-  Simulacion 2020
-  Red de Autovías
-  Red viaria

lógico en el pasillo subbético, alterando su conectividad y fragmentando sus hábitats. El considerable aumento del número de fragmentos en la unidad de los campos litorales y el incremento del índice MSI, que muestra unas estructuras formales más alejadas de la forma circular compacta, podría reflejar el resultado del aumento de accesibilidad que le confiere la RM-2 (Alhama-Fuente-Álamo). Los valores del índice AWMPFD presentan estabilidad en prácticamente todas las unidades, indicando una complejidad de fragmentos muy similar, en cuanto a media se refiere, si bien se produce un decrecimiento importante en los valores de ED, aunque solo en comparación con los valores del año 2000, lo que indicaría una longitud de perímetro por unidad de superficie propia de elementos más compactos. Este fenómeno podría verse condicionado por a la mínima unidad cartografiada del proyecto CLC2000 que adjudicaría perímetros más reducidos a los indicadores de este escenario temporal.

• Análisis Horizontal:

La superposición de cartografías y las métricas de superficie edificada sobre elementos sensibles del paisaje (Tabla 6.5), ponen de manifiesto las áreas de nuevo suelo urbano que pondrían en peligro la continuidad, por ejemplo, de las huertas tradicionales. Las vegas del Segura, el corredor del Guadalentín y los llanos interiores del norte, acaparan, por este orden, las cerca de 3000 nuevas hectáreas de suelo urbano que sustituirían a estos espacios de regadío tan arraigado en toda la región.

La alteración de la fragilidad que supone la proximidad de los cauces a las nuevas transformaciones se hace muy palpable al sur de la capital, en las proximidades de El Palmar, al norte, entre Molina de Segura y Alguazas, y en el espacio que separa Alhama de Murcia y Librilla, viéndose afectadas grandes zonas potencialmente inundables. Los espacios protegidos sin embargo, debido a su falta de accesibilidad y a su condición de restricción en la modelización, no resultan afectados por el crecimiento urbano, como se refleja, en los índices de fragmentación de las unidades de las Sierras prelitorales y Sierra Espuña, sin embargo se anula en algunos casos la posibilidad de creación de zonas de amortiguación o tampón como áreas de transición a proteger y en el caso de la Sierra de Ricote donde sí que se podría ver afectada por una nueva vía de alta capacidad, por el incremento de accesibilidad y por su mayor exposición visual.

La fragilidad intrínseca de algunas zonas de las Vegas del Segura y del Corredor del Guadalentín e incluso, a otro nivel, la de los campos litorales y las cuencas murcianas del norte, se vería muy agravada por la ganancia de exposición visual que les confieren las nuevas infraestructuras proyectadas. La importante mejora en los niveles de accesibilidad de estas últimas, las convierten en áreas de oportunidad para el crecimiento urbanístico cuyo tratamiento habría que cuidar una vez detectada esta tendencia y anticipada su alta vulnerabilidad visual.

UNIDAD	Sup Unid	Suelo Urbanizado		Incremento 00/20		Suelo Prot		Sup Corredor		Urb sobre Buf Rios			Urb sobre Regadíos Trad		
		2000		2020		Actual		Actual		2000	2006	2020	2000	2006	2020
		Has	Has	Has	Has	%	Has	%	Has	%	Has	Has	Has	Has	Has
Muelas, s. y pas. sep.	3560,2	46,2	79,8	33,563	72,578	496,5	13,9	2371,0	66,6	1,5	1,9	1,9	0,2	0,2	0,2
S. y pasillos sub.	7524,5	0,0	2,4	2,4	23920,0	5319,2	70,7	1626,0	21,6	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,9
Llanos int. Norte	5884,8	176,8	603,2	426,4	241,2	376,6	6,4	82,1	1,4	8,5	14,5	18,2	108,4	128,3	454,9
C. murcianas Norte	9822,3	1177,1	1788,8	611,6	52,0	1933,3	19,7	0,0	0,0	1,7	1,9	1,8	38,0	37,9	112,9
C. murcianas Oeste	13845,5	190,1	257,2	67,1	35,3	1222,2	8,8	3087,7	22,3	0,3	0,3	0,3	70,4	113,0	114,1
Llanos int. Oeste	12933,4	80,6	82,6	2,0	2,5	112,3	0,9	6743,3	52,1	3,5	3,6	3,6	4,6	4,5	5,0
C. murcianas Centro	19578,1	510,5	935,0	424,5	83,1	1158,0	5,9	2195,0	11,2	35,4	43,2	55,4	194,1	245,7	447,4
Vegas del Segura	22694,8	6585,2	10188,4	3603,1	54,7	213,2	0,9	545,0	2,4	79,1	92,2	417,4	903,2	1308,1	2438,2
Sierra Espuña	19170,9	97,8	100,0	2,2	2,3	16183,2	84,4	1905,8	9,9	0,0	0,0	0,0	15,4	15,2	15,2
S. del corredor prelit.	2348,9	0,7	0,7	0,0	2,8	1534,7	65,3	850,4	36,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cor.. del Guadalentín	31568,7	1382,4	3115,4	1733,0	125,4	3238,1	10,3	374,2	1,2	20,8	26,3	62,3	351,2	679,1	1916,8
Sierras preitorales	22225,2	185,4	362,7	177,3	95,6	12395,7	55,8	0,0	0,0	3,1	3,7	0,0	1,8	3,3	21,9
Campos litorales	34152,4	1135,7	2530,3	1394,6	122,8	185,4	0,5	0,0	0,0	70,9	88,8	112,5	193,7	309,1	456,9
TOTAL	205309,7	11568,6	20046,4	8477,8	73,3	44368,3	21,6	19780,5	9,6	224,8	276,3	673,3	1880,9	2844,4	5985,4

TABLA 6.5. Métricas espaciales de ocupación de suelo urbano sobre áreas sensibles, protegidas y corredores ecológicos.

UNIDAD	Red de Autov		Increm Aut		Grad Accesib Territ		Urb 2020 sobre Grad Exp visual							
	2000		2020		2000/2020		media		Bajo		Medio		Alto	
	km	km	km	%	min	min	Has	%	Has	%	Has	%		
Muelas, s. y pas. sep.	8,39	8,39	0	0,0	2	8,2	6,9	8,6	0	0,0	0	0,0		
S. y pasillos sub.	0	1,54	1,54		11	29,4	0,9	37,5	0	0,0	0	0,0		
Llanos int. Norte	0	12,69	12,69		13	46	457,3	75,8	141,2	23,4	0	0,0		
C. murcianas Norte	3,76	24,01	20,25	538,6	9	24,8	917,1	51,3	714,1	39,9	28,3	1,6		
C. murcianas Oeste	1,14	1,14	0	0,0	0	0	32,4	12,6	0,2	0,1	0	0,0		
Llanos int. Oeste	7,08	15,03	7,95	112,3	2	19,6	54,7	66,3	0,1	0,1	0	0,0		
C. murcianas Centro	18,79	26,06	7,27	38,7	2,5	51	619,1	66,2	217,8	23,3	0	0,0		
Vegas del Segura	66,55	82,53	15,98	24,0	2	45,8	6020,6	59,1	2878,2	28,2	0	0,0		
Sierra Espuña	0	0	0	0,0	0	0	22,2	22,2	35,88	35,9	27,6	27,6		
S. del corredor prelit.	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0,2	27,4	0,5	68,5		
Cor.. del Guadalentín	51,72	64,38	12,66	24,5	1,1	37,5	848,9	27,2	1385,3	44,5	625,3	20,1		
Sierras preitorales	8,33	10,4	2,07	24,8	3,7	32,5	196,8	54,3	148,5	40,9	6,72	1,9		
Campos litorales	6,98	46,95	39,97	572,6	19,4	60,5	1516,4	59,9	677,7	26,8	2,81	0,1		
TOTAL	172,74	293,12	120,38	69,7	5,2	60,5	10693,4	53,3	6199,2	30,9	691,2	3,4		

TABLA 6.6. Gradiente de accesibilidad por unidades y métricas de superficie urbana simulada sobre áreas visualmente vulnerables.

6.6. Conclusiones

Lejos de intentar cuestionar la validez o no de este modelo de simulación espacio – temporal, de su sensibilidad o robustez, o del controvertido asunto de la elección de unos u otros índices espaciales, de su aplicabilidad o de su sensibilidad a la escala, de la que existe bibliografía especializada muy reciente (Aguilera, 2010), fuera también de las discusiones sobre la subjetividad o arbitrariedad en algunas de las etapas de la modelización, nos limitaremos aquí a resaltar las aportaciones más relevantes, a la vista de los resultados obtenidos, sobre la metodología utilizada.

La integración de las variables de accesibilidad territorial como factores para la simulación del crecimiento urbano permite incorporar aspectos como las distancias

no euclidianas de acceso a los nudos de la red de alta capacidad y de acceso a los servicios e infraestructuras propios de un núcleo urbano consolidado, lo que, a nuestro juicio, constituye una de las mayores aportaciones del presente trabajo. El gradiente de accesibilidad territorial añade la dimensión temporal relativa a la ejecución de las infraestructuras viarias tan decisiva en el fenómeno de expansión urbanística. La simulación para 2006 y el escenario propuesto para 2020, con la incorporación de los nuevos tramos de autovía previstos, se nutren de estos mapas sintéticos, y se muestra como una herramienta útil para la proyección en el tiempo de fenómenos de crecimiento urbano.

El empleo de indicadores de análisis espacial, para

comparar escenarios reales y simulados (Berling-Wolff et al. 2004), junto a métricas basadas en la localización exacta de los nuevos crecimientos y mediante buffers sucesivos (Pascual et al. 2010), parece una agrupación interesante para la validación de los resultados obtenidos y comprobar el ajuste, tanto en su estructura formal como en su localización, de estos con la realidad.

Su utilización para valorar el resultado de la modelización con horizonte del 2020 hace posible el reconocimiento y monitorización de los cambios estructurales que se podrían inducir en los paisajes y servir de argumento para los diferentes agentes en los procesos de planificación territorial e infraestructural. Es necesario sin embargo hacer notar las dificultades e inconvenientes que la cartografía de base y su tratamiento han aportado a este trabajo, siendo necesarias labores de homogeneización y filtrado (mediante un autómata celular sencillo) previas a la conversión de formatos, que pueden desvirtuar de alguna forma la precisión de los valores de los índices. El uso de imágenes satelitales de una resolución semejante, como alternativa a las cartografías utilizadas, y un tratamiento también raster de las métricas podrían haber resuelto algunas de estas dificultades. En cualquier caso, éste no pretende ser el aspecto de mayor interés del estudio.

La identificación y representación espacial de las alteraciones en la fragilidad eco-paisajística y su tratamiento metodológico mediante la integración de los gradientes de exposición visual y las métricas de la evolución de la superficie urbana y su cercanía a zonas sensibles, si que pueden ser de gran utilidad para la ordenación territorial y gestión del paisaje, permitiendo establecer relaciones entre esta alteración y las características del ámbito estudiado y simular una posible fragilidad futura. Sería interesante, por tanto, en las primeras etapas de la planificación (en los proyectos básicos de trazado y en los análisis de alternativas) un tratamiento más cuidadoso de las unidades de paisaje, de su fragilidad visual y de los ecosistemas afectados.

Pese a la reconocida incertidumbre de las decisiones que guían los procesos de urbanización, los análisis cuantitativos de accesibilidad y su incidencia sobre los cambios en los usos del suelo y del paisaje, pueden tener un fuerte potencial como instrumento en la planificación. La modelización desarrollada en este trabajo permite

una aproximación a los horizontes futuros a establecer y a las medidas de protección del paisaje necesarias para la implementación de modelos de planificación integrada. Las cartografías generadas al efecto permiten la mejor comprensión de los fenómenos estudiados, de las variables explicativas y de los posibles escenarios de ocupación urbana.

CAPITULO 7

Cartografiar el tiempo.....267

7.1. Aproximaciones a la representación del espacio tiempo.

7.1.1. Análisis dinámicos y estudios multitemporales

7.1.2. Cartogramas.

7.1.3. Anamorfosis, la deformación del espacio.

7.2. Las ciudades en tiempo real.

7.3. Cartografiando la actividad urbana. Una aplicación práctica en la ciudad de Almería.

7.4.1. Introducción.

7.4.2. Datos de partida.

7.4.3. Metodología.

7.4.4. Resultados.

7.4. Conclusiones.

7 CARTOGRAFIAR EL TIEMPO

7.1. Primeras aproximaciones a la representación del espacio tiempo.

El tiempo introduce la noción de movimiento y el sentido del proceso de cambio en los análisis espaciales. Una de la más importantes contribuciones a esta temática la aporta Gail Langran en su *Time in Geographic Information Systems* (1992) donde se describen un buen número de ejemplos de aplicación a la gestión de recursos forestales, a planificación urbana y regional, a la investigación en temas medioambientales, a la gestión y planificación de infraestructuras, al transporte y a la producción cartográfica. Sin embargo, la cuarta dimensión no es fácilmente manejable. Los SIG comerciales más comunes solo son capaces de manejar dos o tres dimensiones e incluso la tercera es frecuentemente tratada como un atributo más en la base de datos.

7.1.1. Análisis dinámicos y estudios multitemporales

Recientemente los SIG han desarrollado capacidades interesantes en la construcción de estos modelos, salvando sus tradicionales limitaciones mediante la incorporación de nuevos módulos de cálculo desarrollados por punteras casas comerciales (LCM o CA_Markov para Idrisi) o bien mediante la interoperatividad con otros programas informáticos como ya se vió en el caso del software HecRas y el módulo HecGeoRas para ArcGis.

Los modelos dinámicos expuestos en los capítulos anteriores, con la inclusión de la variable temporal, bien de forma discreta o continua, permiten simular la evolución de un estado temporal a otro.

La solución más sencilla es tratar al tiempo como una nueva dimensión cartográfica a añadir a las dos tradicionalmente tratadas en los mapas. Esta nueva dimensión, la temporal, se superpondría de forma independiente, a las espaciales. En este contexto la concepción del tiempo que mejor se adapta al tratamiento SIG es el modelo

de la secuencia de mapas o Snapshot Model (Armstrong, 1988). Así, cada estado del fenómeno a representar se materializa en un mapa o estrato temático de una colección de capas asociadas cada una a un instante de tiempo particular. (Figuras 7.1).

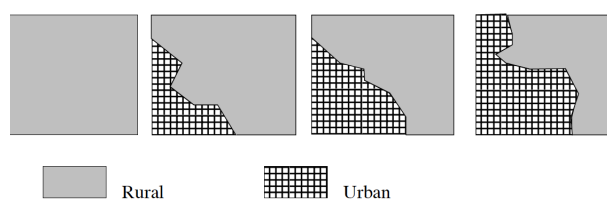


FIGURA 7.1. Serie de mapas temáticos o instantáneas

Las actuales ortofotografías aéreas que recogen instantáneas del territorio en intervalos de tiempo variable suponen un valioso material para la confección de cartografías de este tipo. El estudio de la evolución de ciertos fenómenos territoriales parten en numerosas ocasiones de las primeras fotografías aéreas existentes, georreferenciadas o no, es el caso del vuelo americano del USAF de los años 1956 y 1957 o del vuelo Ruiz de Alda de 1928-1932 localizado en la cuenca del Segura. Los vuelos fotogramétricos realizados en el ámbito andaluz se reflejan en la tabla 7.1

AÑO	ESCALA	COLOR	ÁMBITO	ORGANISMO
1946	1:40.000	B/N	ESPAÑA	USAF
1956	1:33.000	B/N	ANDALUCÍA	USAF, Min. Defensa
1977	1:18.000	B/N	ESPAÑA	Min. Agricultura y Pesca
1984	1:40.000	B/N	ANDALUCÍA	ICA
1985	1:30.000	B/N	ESPAÑA	IGN
1991	1:20.000	B/N	HU-SE-CO	ICA
1992			CA-AL	
1993			SE-MA-CO	
1994			GR	
1995			AL	
1996			JA	
1995	1:60.000	COLOR	AND Oc.	ICA
1996			AND Or.	
1997	1:40.000	B/N	ESPAÑA	Min. Agricultura y Pesca
1998	1:60.000	COLOR	AND OCC	ICA, CMA, CAP
1999			AND ORI	
2001	1:20.000	B/N	AND ORI	ICA, CMA, CAP
2002			AND OCC	
2004	1:60.000	Infrarrojo	SE ANDALUCÍA	ICA
		COLOR	SW ANDALUCÍA	PNOA
2005	1:20.000	Infrarrojo	NE ANDALUCÍA	ICA
		COLOR	NW ANDALUCÍA	IGN, ICA, CMA, CAP
2006	1:60.000	IRGB B/N	SE SW ANDALUCÍA	PNOA
		IRGB B/N	NE NW ANDALUCÍA	IGN, ICA, CMA, CAP
2007	1:60.000	IRGB B/N	ANDALUCÍA	ICA
2008	1:20.000	IRGB B/N	SW y SE ANDALUCÍA	PNOA

TABLA 7.1. Vuelos fotogramétricos en la comunidad andaluza

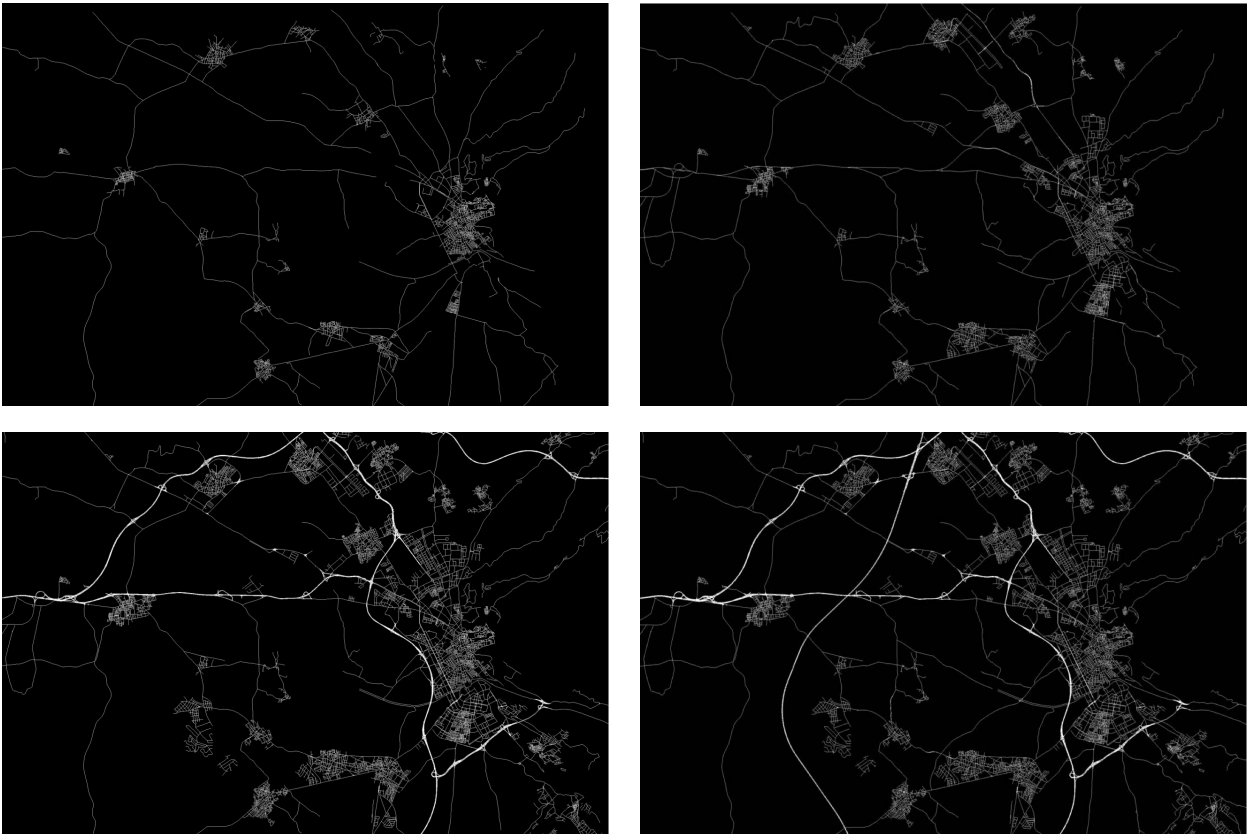
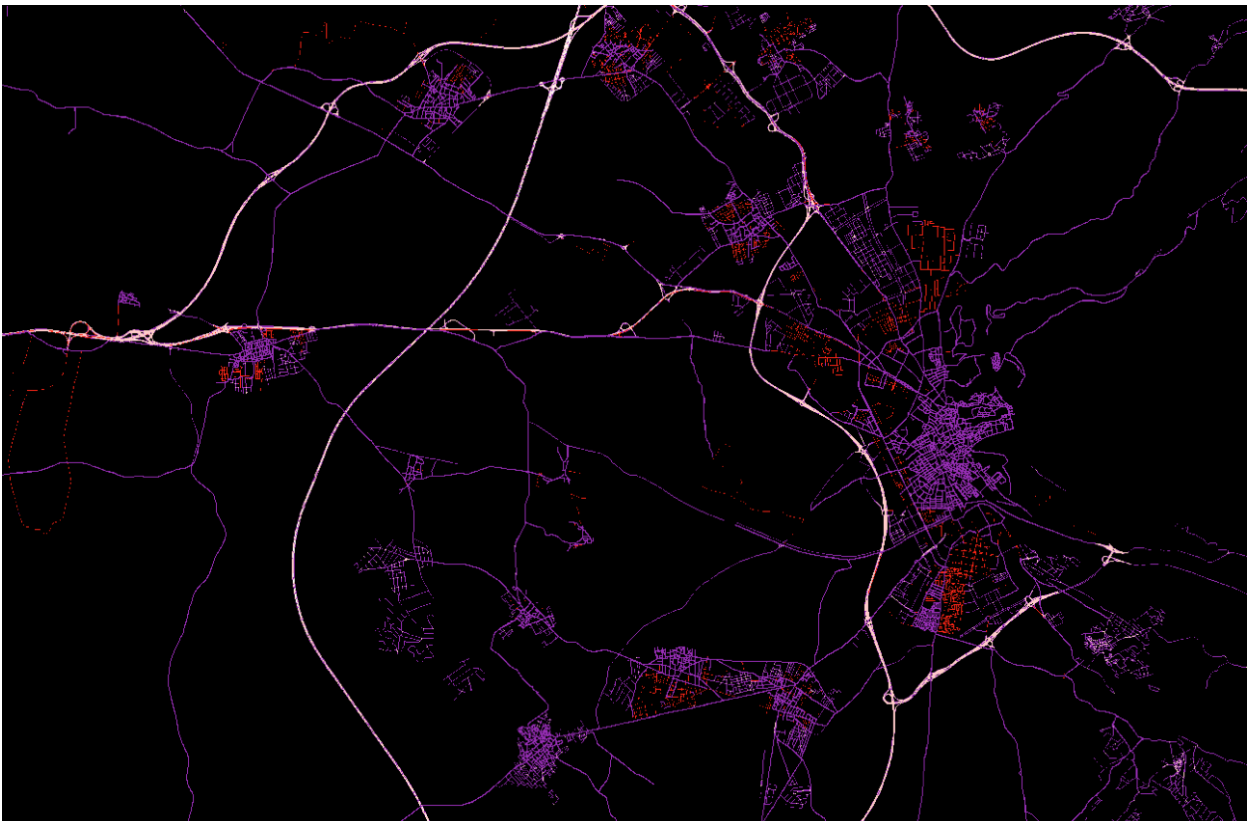


FIGURA 7.2. y 7.3. Secuencia de mapas o snapshot model (arriba) y modelo STC (abajo). Evolución del viario en el Area metropolitana de Granada. Elaboración propia.



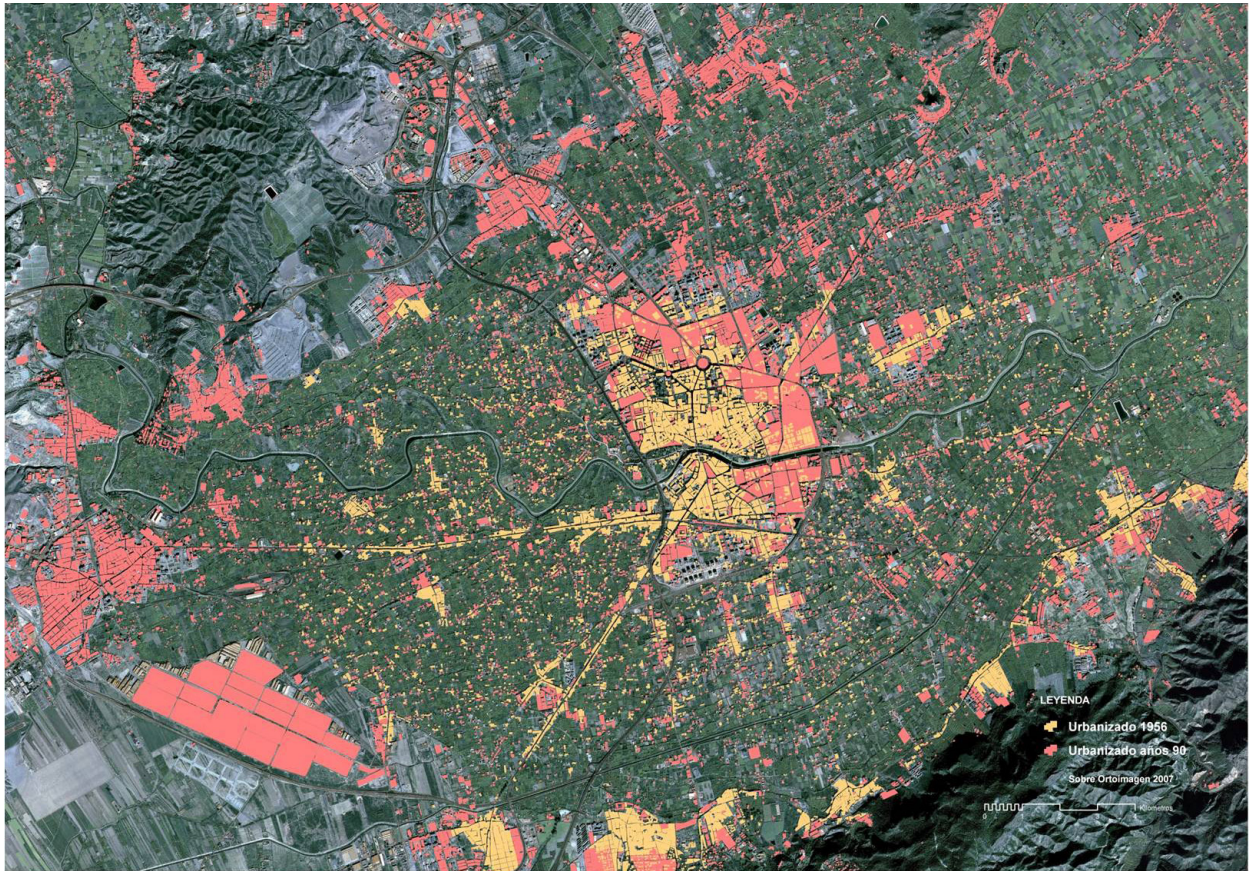


FIGURA 7.4. Evolución del crecimiento urbano en la ciudad de Murcia. modelo STC. Elaboración propia sobre ortofotografía Quick-bird.

El modelo denominado STC (Space-Time Composite), propuesto por Langran y Chrisman en 1988, supone una modificación del modelo de instantáneas, en el que la información, los cambios, se representan en un modelo bidimensional. Los diferentes episodios en la evolución de un fenómeno se representan en una sola capa por lo que se evita la redundancia de datos (Figuras 7.3 a 7.5)

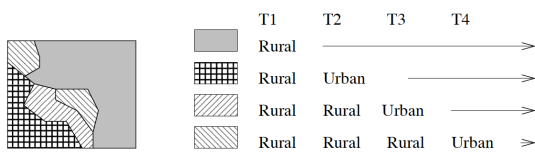


FIGURA 7.5. Modelo Space-Time Composite

Un paso más consistiría en identificar los cambios individuales o eventos para el conjunto de datos representando los acontecimientos de manera explícita. Es el Event-Oriented Models (Peuquet, 1994) (Figura 7.6) .

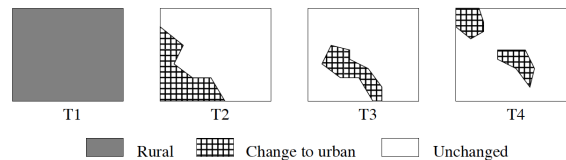


FIGURA 7.6. Modelo orientado a eventos

Todos los cambios realizados para cada conjunto de datos se registran en un registro de transacciones que proporcionará toda la información necesaria en un sistema espacio-temporal. La base de datos real actuaría entonces como una base de datos del estado actual, y con el fin de obtener los estados históricos de la hoja, un “retroceso” se puede obtener mediante el trazado del registro de transacciones al revés. Por lo tanto, el registro de transacciones en sí es realmente una base de datos temporal.

Otros modelos como los citados a continuación, tratan de aproximarse también de forma teórica a la representación del espacio tiempo desde diferentes perspectivas:

Spatio-Temporal Object-Oriented (Worboys, 1990)
 The Three-Domain Model (Yuan, 1994)
 The History Graph Model (Renolen, 1996)
 The Spatio-Temporal Entity-Relationship (Tryfona, 1997)
 Object-Relationship (Claramunt, 1998)
 Moving Object Data Models (Erwig, 1999)
 Intentionally-Linked Entities (Kantabutra, 2007)

El procedimiento clásico utilizado para el análisis de los cambios espaciales cuando la variable es discreta (por ejemplo el uso del suelo), es la denominada tabulación cruzada e intersección de mapas. Se genera así una tabla de doble entrada donde en las filas se sitúan las variables existentes en uno de los mapas y en las columnas las del otro. Cada casilla de la tabla indica la superficie de cambio de una variable a la otra.

Un avance supone el establecimiento de los vínculos de unión entre el estado inicial y final de la serie temporal a través de métodos estadísticos de carácter funcional. La integración de las variables explicativas mediante el uso de funciones polinomiales a modo de indicadores intermedios, incorporando técnicas estadísticas como la regresión, permiten obtener cartografías de carácter prospectivo o retrospectivo.

En los modelos de simulación de la realidad, el espacio y el tiempo pueden ser tratados de forma discreta, a saltos, o de forma continua. En el primer caso la progresión del fenómeno se produce por aplicación del algoritmo matemático en diversos intervalos de tiempo, mientras que en el caso continuo se realiza mediante ecuaciones

diferenciales.

Finalmente, como ya se trató en capítulos anteriores, existen algoritmos de cálculo más complejos, como las ya citadas cadenas de Markov o las redes neuronales que permiten la transformación de una estructura espacial a partir del conocimiento y relación de capas de información preexistentes y de la relación que mantienen con variables explicativas que se consideran clave.

7.1.2. Cartogramas. Anamorfosis, la deformación del espacio.

Cartograma es la representación de un espacio poligonal que se deforma (contiguamente o no con sus vecinos) en función del valor de una cualidad (población, densidad, ..). En este campo destacan las aportaciones de autores como Colette Cauvin, Jean-Charles Denain y Patrice Langlois:

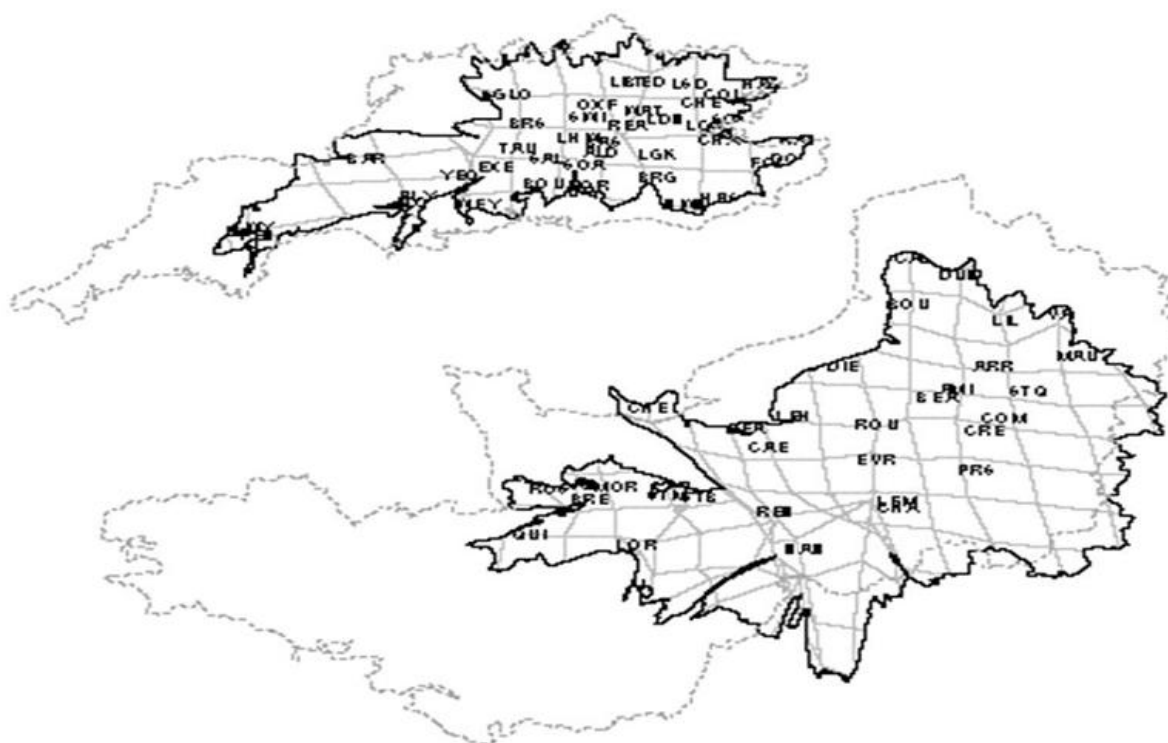
1989 “Cartographic transformations and the piezopleth maps”
 1995 “Transformações cartograficas espaciais e anamorfoses”
 1998 “Des transformations cartographiques”
 1998 “Cartographie en anamorphose”
 1997 “Anamorphose, analyse d’une métaphore spatiale”
 2003 “Anamorphose par transformations pseudo-équivalentes”

Anamorfosis, la deformación del espacio.

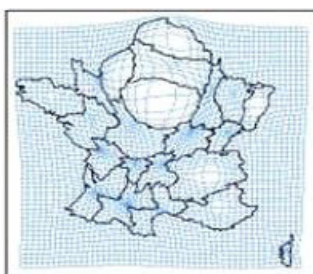
En las anamorfosis geográficas, se conserva la continuidad del espacio, pero las componentes geográficas (latitud y longitud) se deforman intencionadamente, para que el dibujo traduzca las variaciones de una componente cualitativa dada. Las unidades geográficas conservan en lo posible sus posiciones relativas, pero su superficie se hace proporcional al valor del carácter considerado para subrayar fuertemente las desigualdades de la variable. (Figuras 7.7 a 7.16)

Jean-Charles Denain y Patrice Langlois merecen igualmente una cita por sus trabajos:

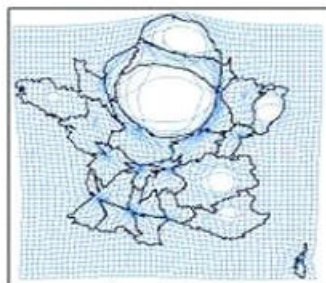
1998 “Cartographie en anamorphose”
 1997 “Anamorphose, analyse d’une métaphore spatiale”
 2003 “Anamorphose par transformations pseudo-équivalentes”



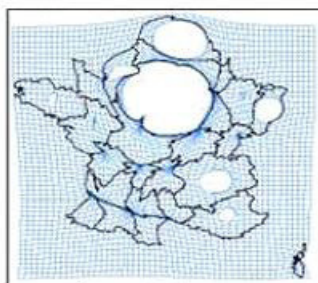
a: image non déformée



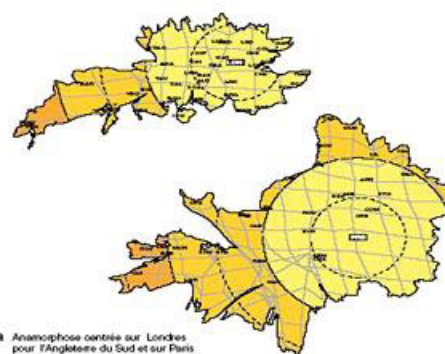
b: dômes de degré 2



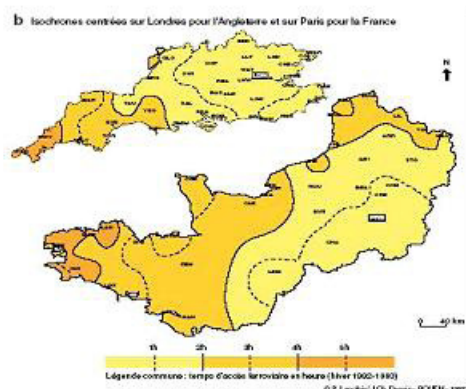
c: dômes de degré 4



d: insertion de trous



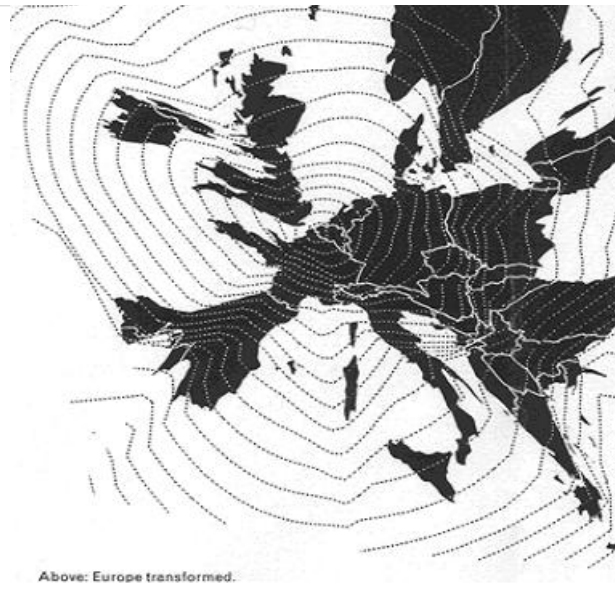
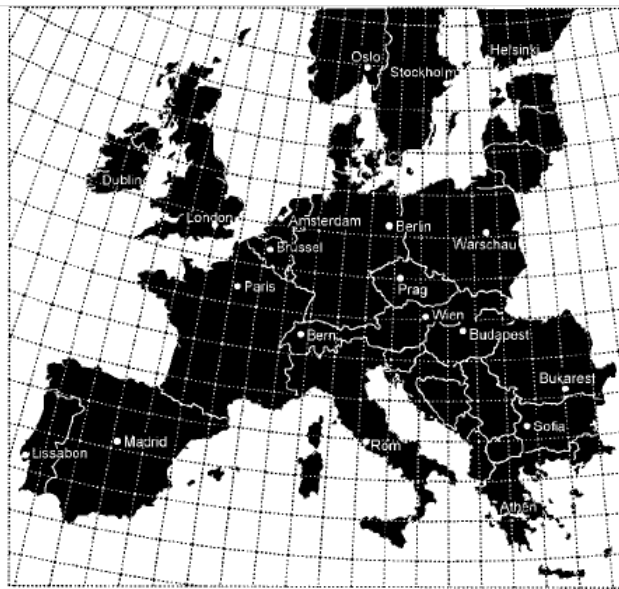
a Anamorphose centrée sur Londres pour l'Angleterre du Sud et sur Paris pour la France du Nord-Ouest



b Isochrones centrées sur Londres pour l'Angleterre et sur Paris pour la France

Légende commune: temps d'accès ferroviaire en heure (1 h et 1902-1992)
 © P. Laghi, J.C. Oudin, ROEH - 1991

1 • FIGURAS 7.7. a 7.9 Ejemplos de Anamorfofis. Fuente: Cauvin et al.



Above: Europe transformed.

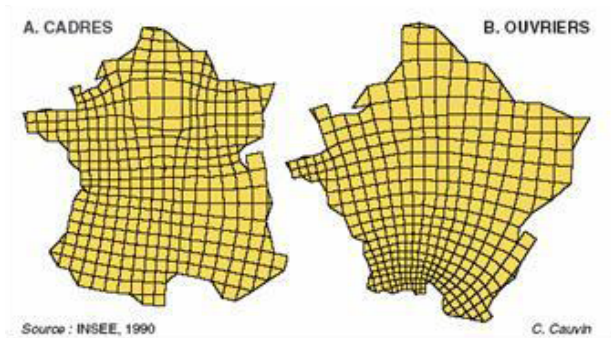
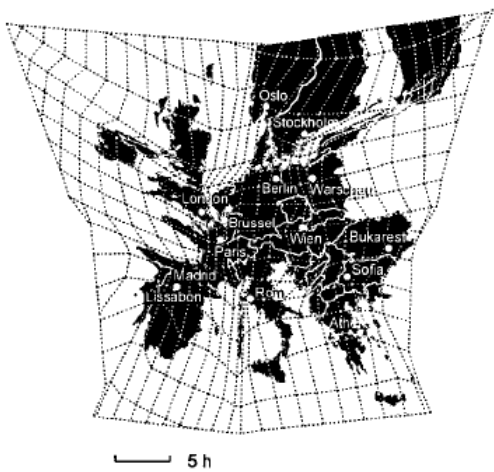
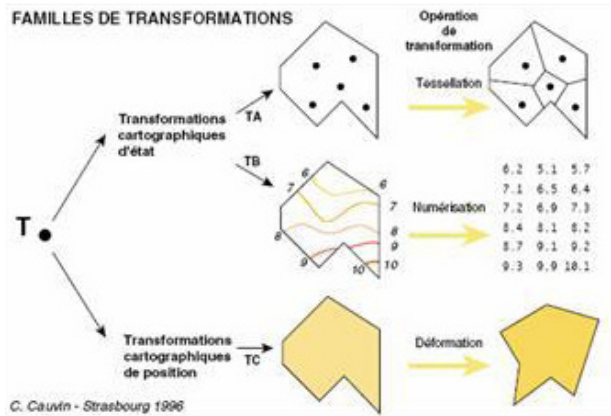
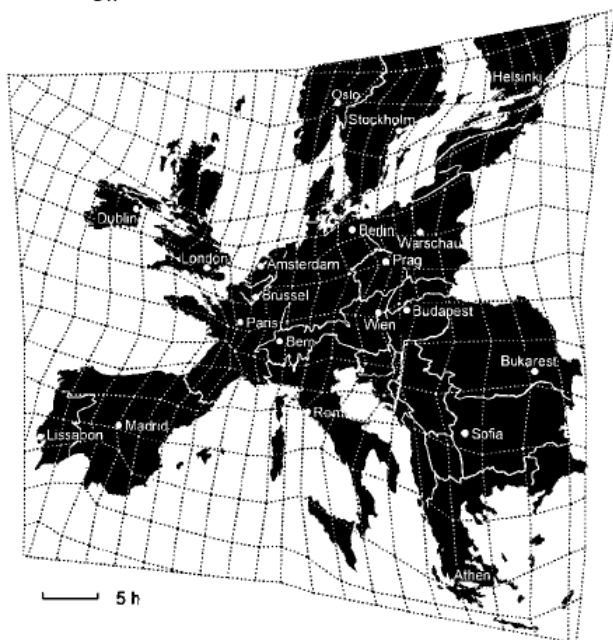


FIGURA 7.10. Ejemplos de Anamorfosis

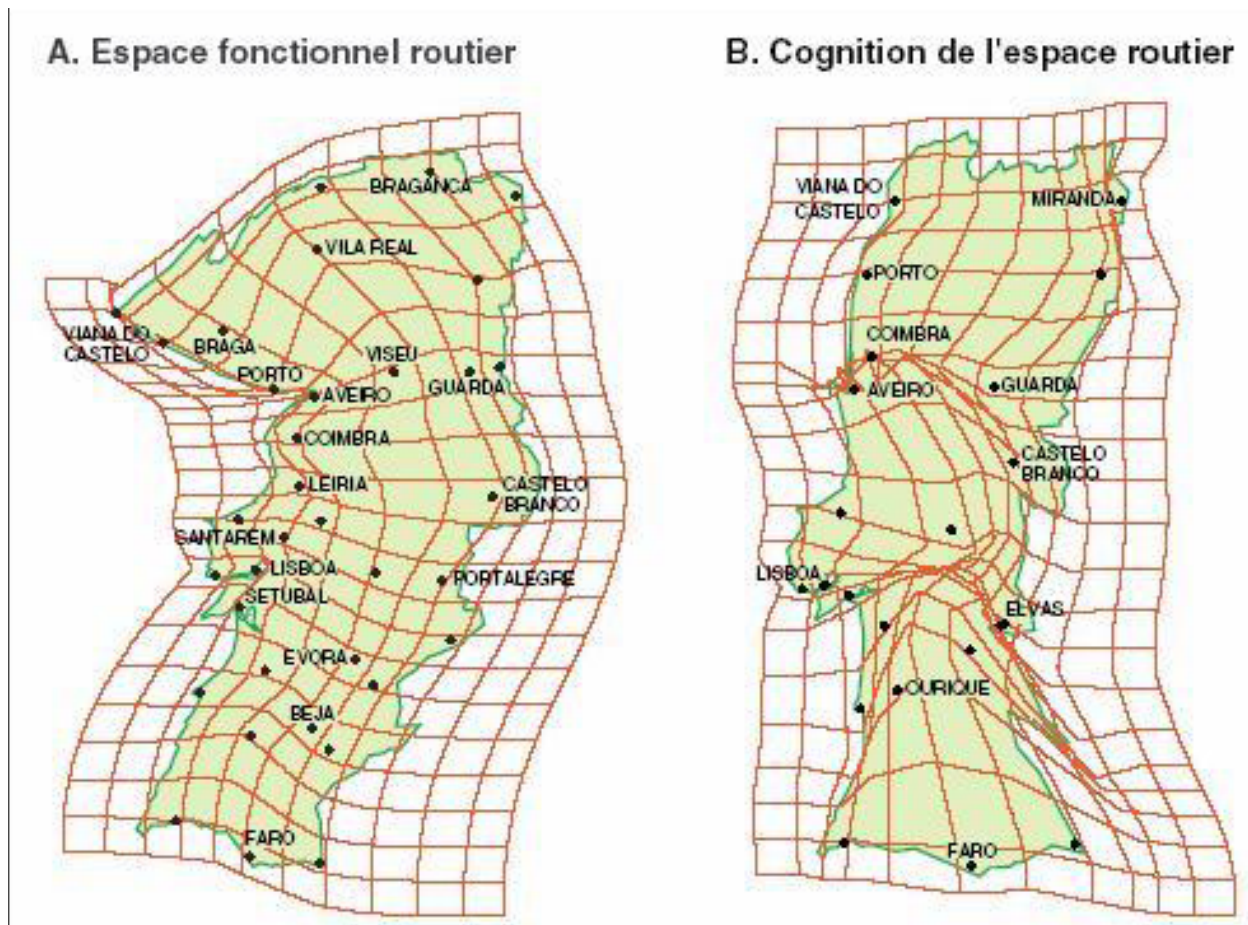


FIGURA 7.11. Anamorfosis de Portugal

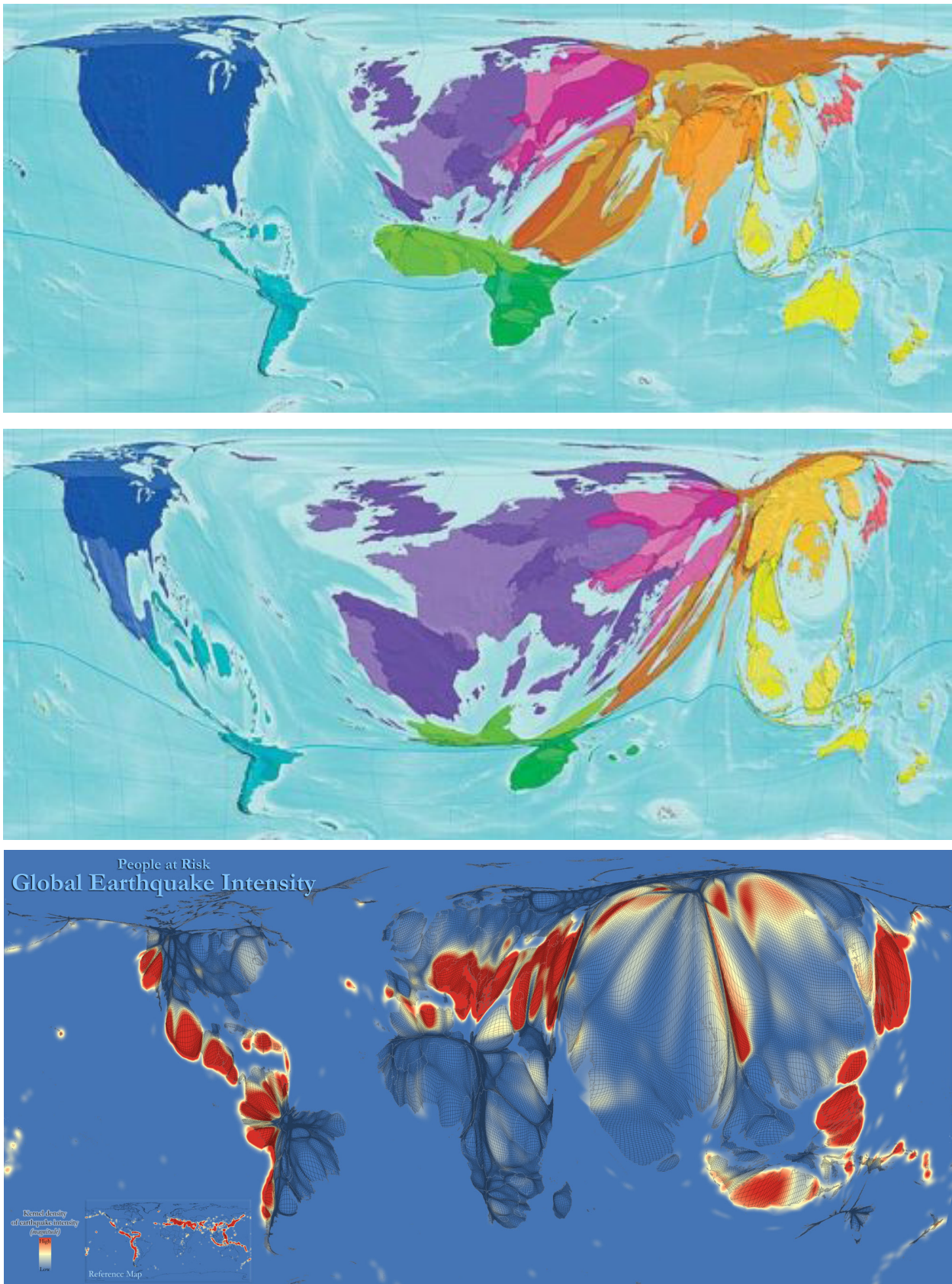
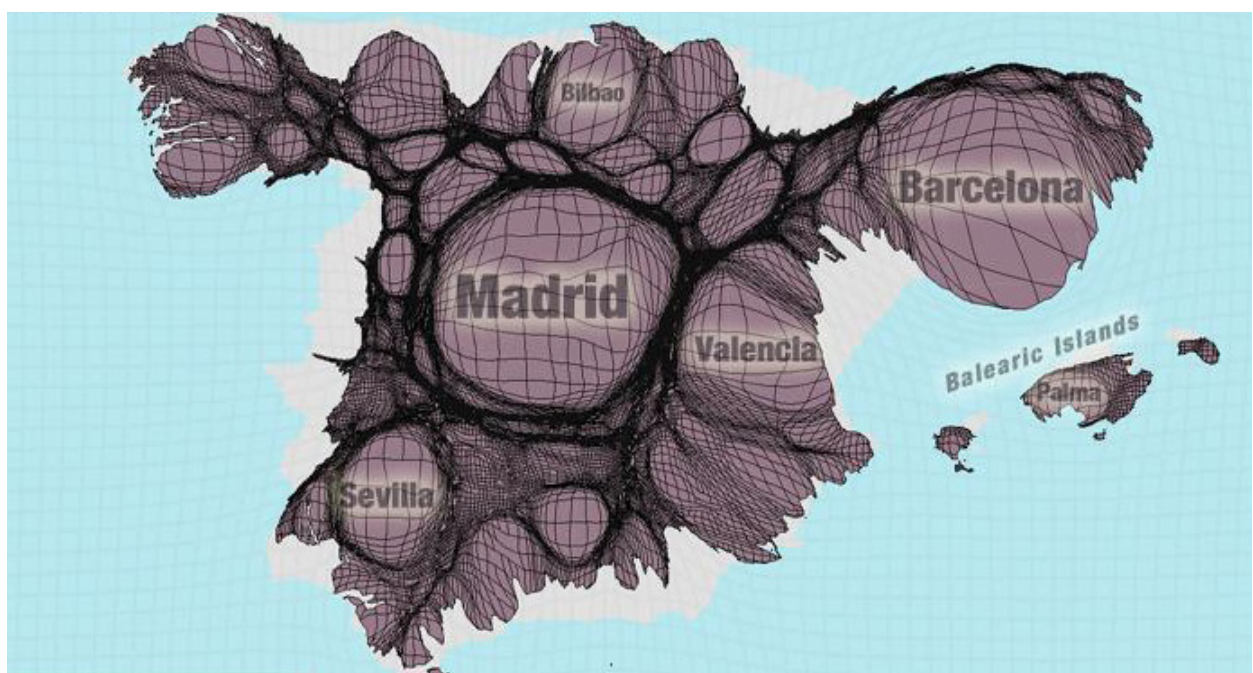
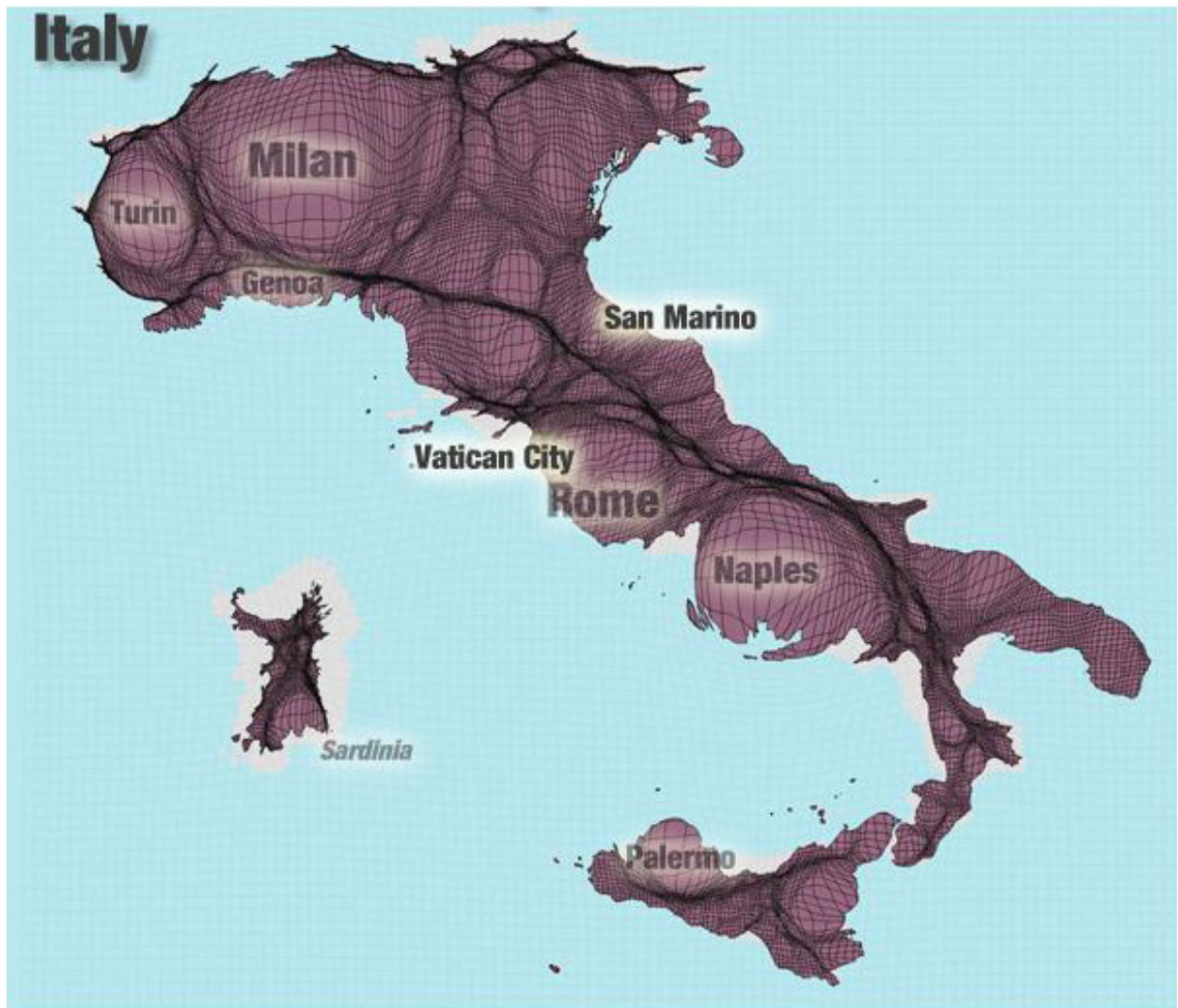


FIGURA 7.12. a 7.16. Cartogramas según turismo y riesgo sísmico.(arriba). Cartogramas de población en Italia y España.



7.2. Las ciudades en tiempo real

La ciudad, un entorno que solo supone el 2% de la superficie terrestre, pero donde vive la mitad de la población mundial, que consume el 75% de la energía y genera el 80% de los residuos, demanda de nuevas lecturas alejadas de la estaticidad de la cartografía propia del planeamiento tradicional y del “zonning”. Las nuevas técnicas ligadas a la electrónica, a las telecomunicaciones y a la informática permiten aproximaciones novedosas a las dinámicas urbanas, a la actividad de sus habitantes, a las diferentes energías que la ciudad es capaz de desprender a lo largo de una jornada.

El interés del autor de esta tesis por dibujar diferentes modelos de una misma ciudad, por generar distintas cartografías urbanas según la franja horaria que nos interese, de descubrir la ciudad temprana, la de los negocios, la del ocio, la de los eventos deportivos o musicales, o la de la noche, comienza en Junio de 2006 tras la lectura de una noticia de prensa que afirmaba que en España había más móviles que habitantes.

Las primeras intuiciones del autor al abordar este reto de cartografiar la “temperatura” de la ciudad, la energía de los ciudadanos que pueblan las urbes, fueron encaminadas al uso de imágenes procedentes de sensores satelitales con rangos espectrales próximos al infrarrojo térmico. Imágenes sugerentes de las ciudades captadas de noche (Figuras 7.17 y 7.18), parecían aproximarse también a la idea original. Pero estas opciones fueron finalmente desechadas debido a las características de los “programas” satelitales existentes, principalmente a la resolución espacial de las imágenes obtenidas (el detalle marcado por el tamaño de la unidad mínima cartografiada o píxel) y sobre todo a la resolución temporal de los sensores (frecuencia de recogida de información) que no permitían.

Una segunda tentativa se aproximaba a los actuales mapas de ruido (Figuras 7.19 y 7.20), pero la ciudad quedaba reducida prácticamente al tráfico generado y la resolución temporal restringida a los instantes de recogida de la información, tradicionalmente una hora punta y otra valle.

Ambas tentativas parecían al menos muy limitadas para el objetivo marcado.

Los trabajos desarrollados en Amsterdam (Polak, 2002), Tallinn, Estonia, (Ahas y Ular, 2005), Milán (Ratti, Pulselli et al., 2005) y Roma (Calabrese y Ratti, 2007), utilizándolos adelantos en el campo de las telecomunicaciones y la noticia citada anteriormente, que sirvió de catalizador, marcaron un camino que podría dar solución a esta inquietud.

La experiencia que motiva la aplicación práctica presentada en el epígrafe siguiente fue realizada en 2005 por el SENSEable City Lab del Massachusetts Institute of Technology (MIT), dirigido por el arquitecto italiano Carlo Ratti.

Titulada *Graz en tiempo real* y localizada en esta pequeña ciudad austriaca, se basa en la novedosa cartografía de fenómenos dinámicos, en este caso del volumen de tráfico en “tiempo real” en la red de telefonía móvil.

La ciudad se convierte en una gran red de informaciones georreferenciadas generadas por cada terminal móvil y recogidas por las estaciones base situadas en cada barrio. Con el apoyo del operador de telefonía local A1/Mobikom, las conexiones telefónicas son recogidas y posteriormente cartografiadas en forma de mapas de densidad para cada franja horaria (Figuras 7.28 y 7.29), así como su origen y destino. También se incluyeron la posición y evolución geográfica de los teléfonos en diferentes momentos.

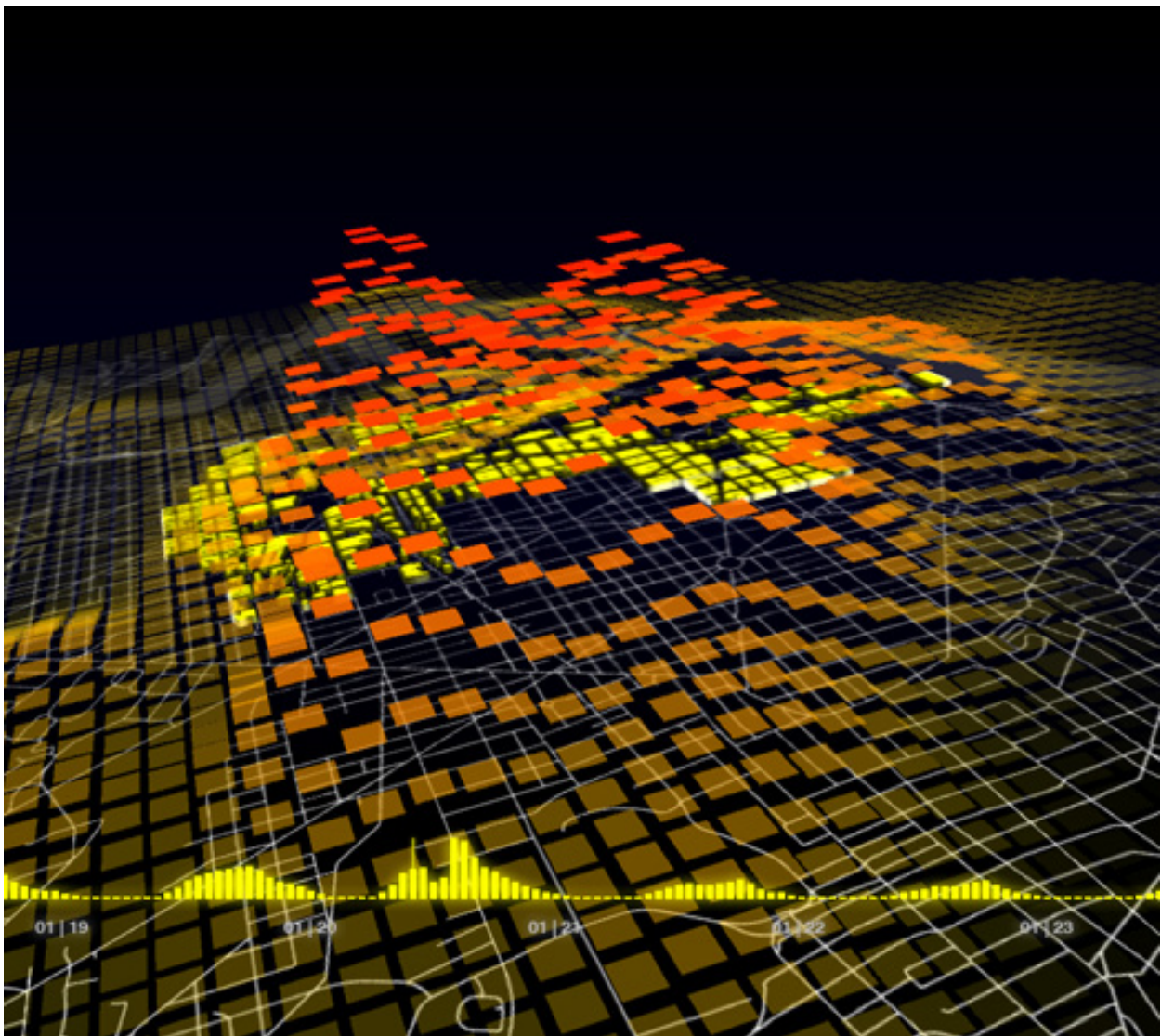
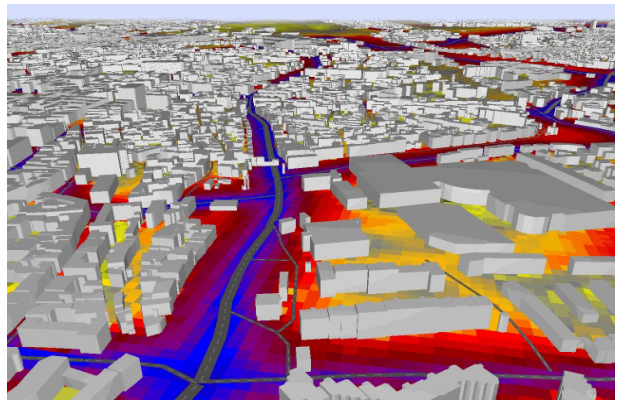
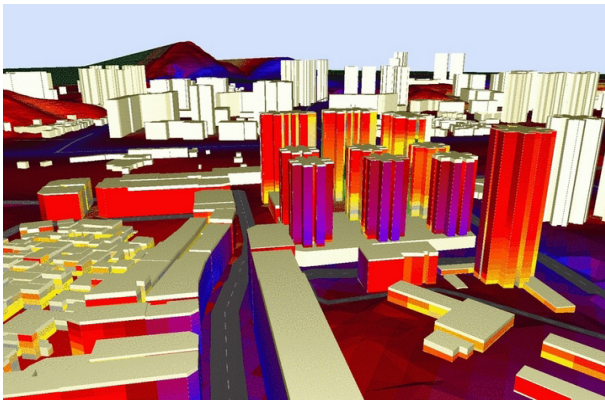
Con todos estos datos se generaron superficies continuas e isolíneas de actividad que se superponen a las cartografías base, señalando en ellas los picos y valles del paisaje según el uso de los teléfonos móviles.

El resultado es una secuencia de imágenes inéditas de una ciudad en tiempo real, una nueva percepción del fenómeno urbano que desvela la actividad ciudadana de una forma viva y dinámica y que puede abrir nuevas posibilidades a los estudios de planificación urbanística.

A partir de esta primera experiencia se han desarrollado variaciones de esta, como la realizada de Julio de 2006 en la ciudad de Roma, con motivo de la final de la Copa de Mundo de Fútbol o en Agosto del mismo año en los al-



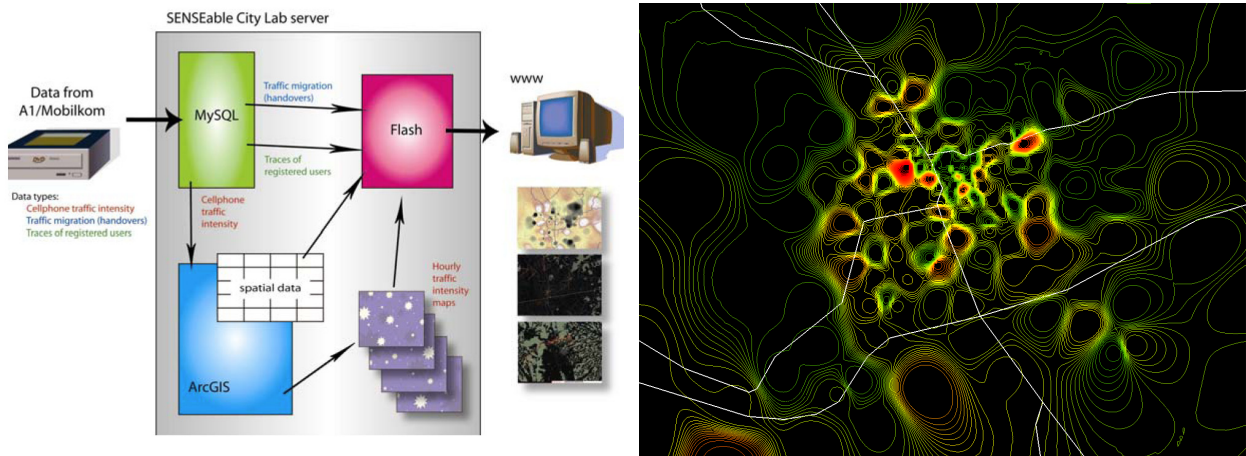
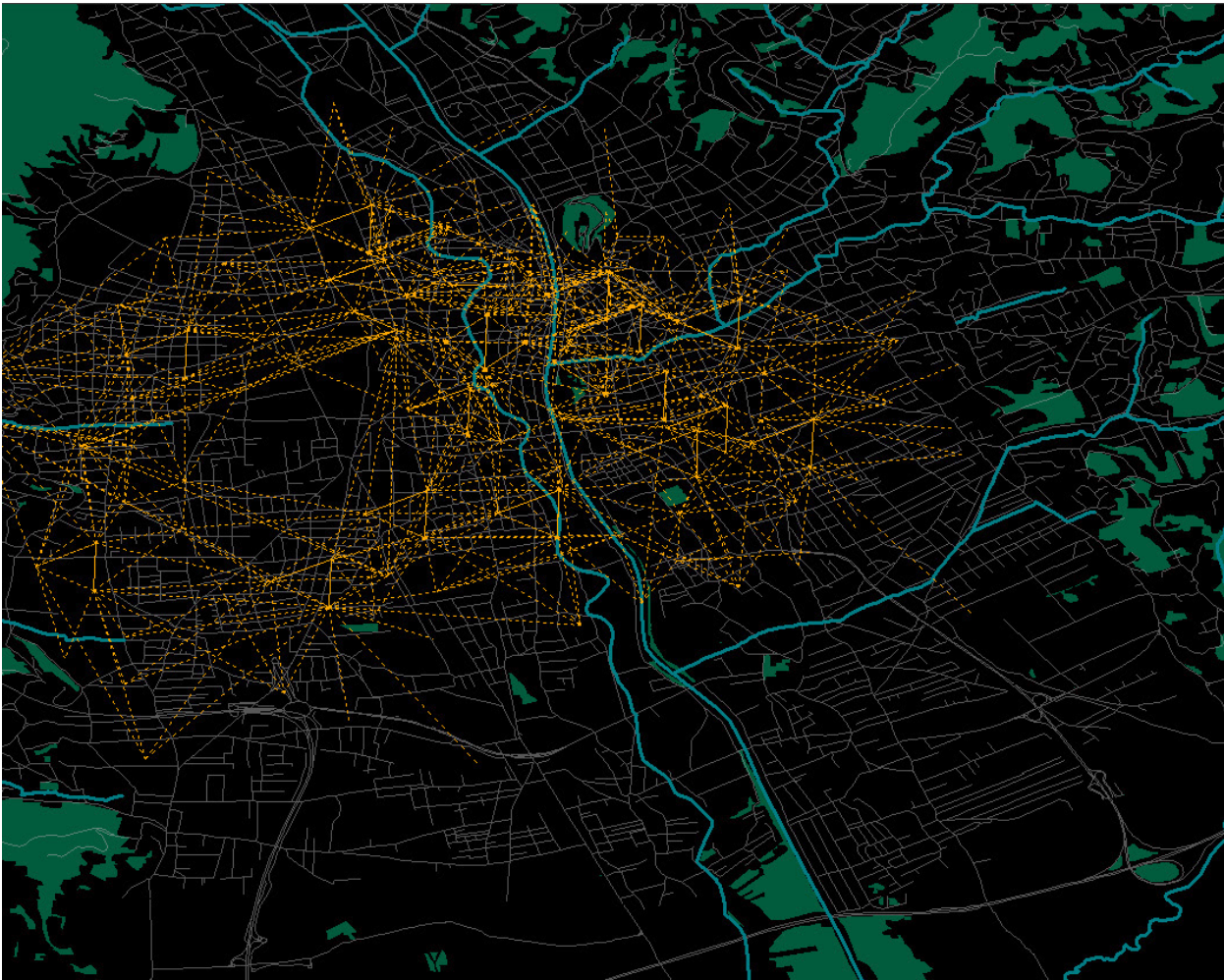
FIGURAS 7.17. y 7.18. Imagen de la ciudad nocturna vista desde satélite. Abajo la ciudad de Sevilla.



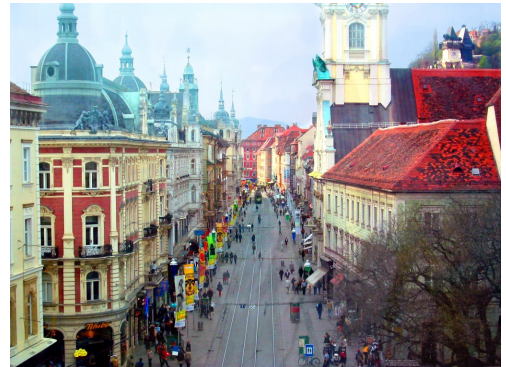
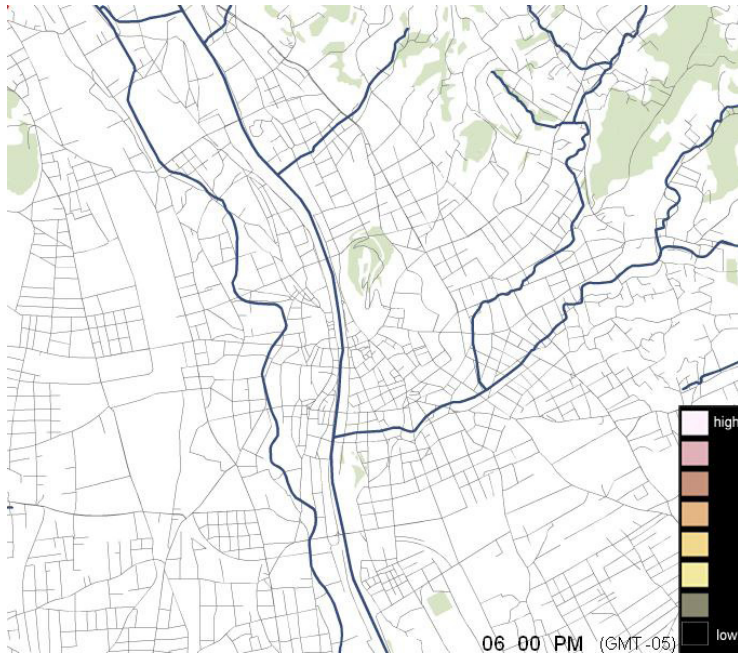
FIGURAS 7.19. a 7.21. Representación tridimensional de un Mapa de ruido .

rededores del Estadio Olímpico donde acontecía un macroconcierto de Madonna (Figuras 7.36 y 7.37).

También desde el MIT se indaga y se experimenta en el uso de redes Wifi en el campus del MIT (Figuras 7.x), así como en el uso de la telefonía móvil y la movilidad urbana en la ciudad italiana de Milán.

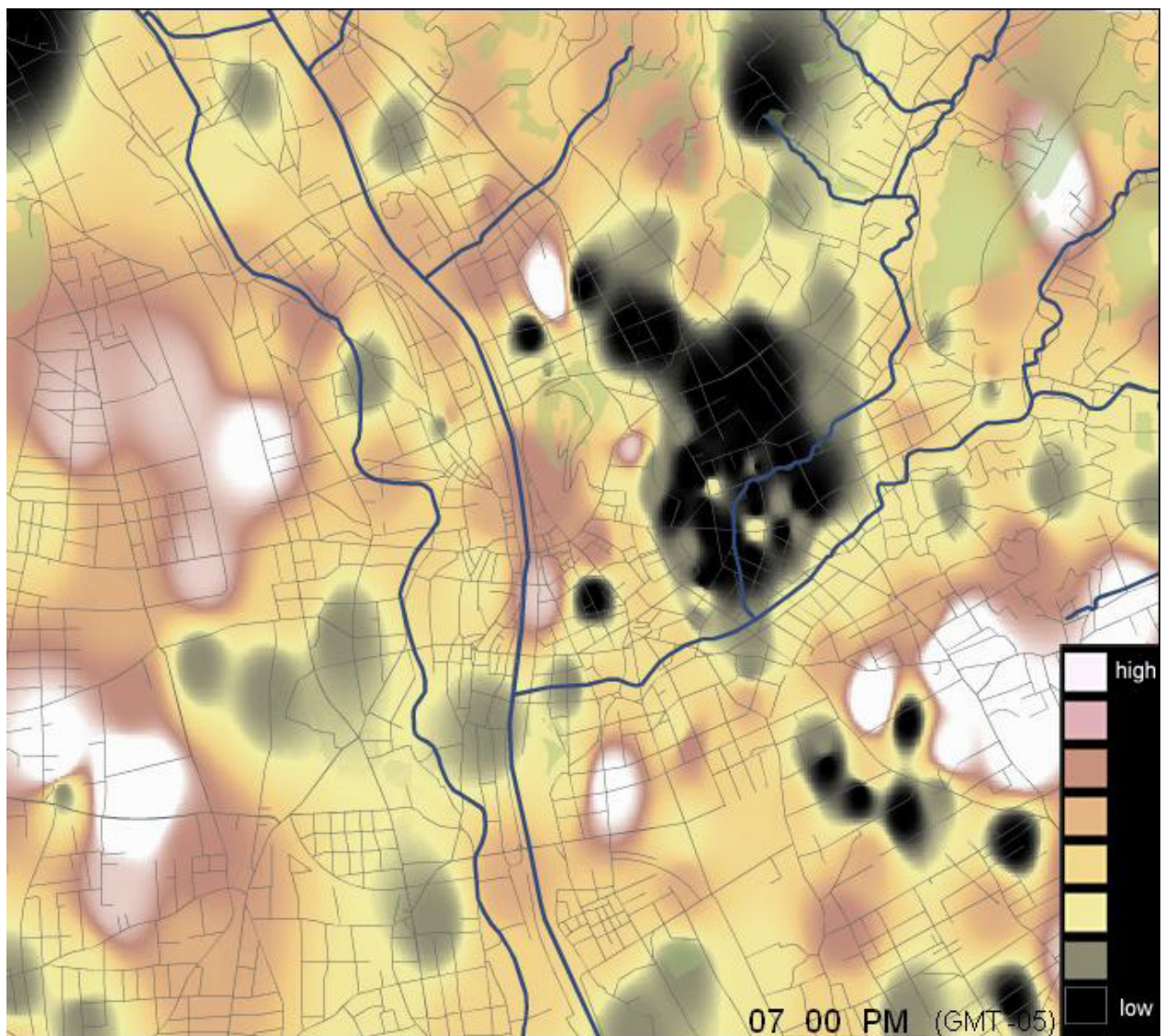


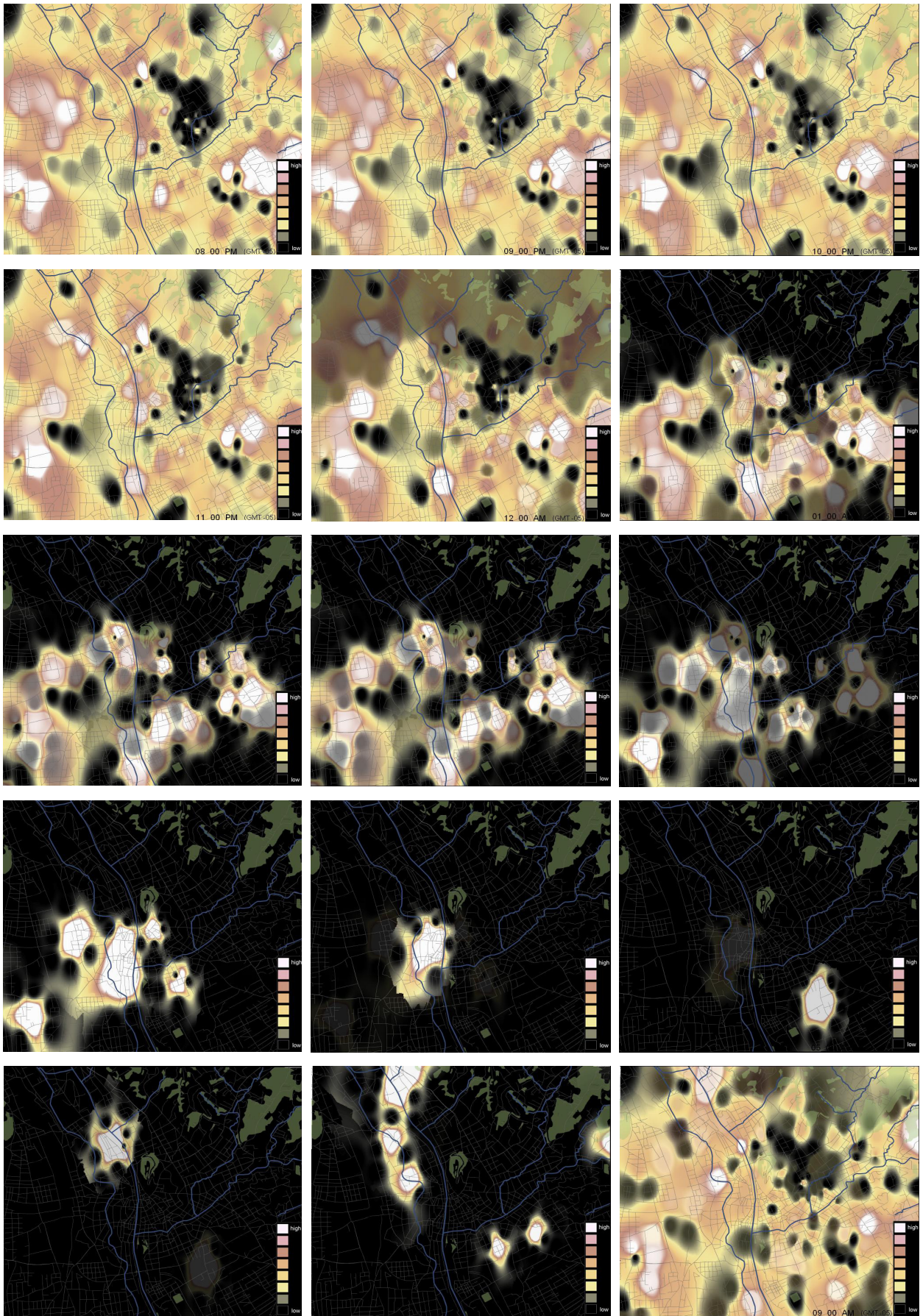
FIGURAS 7.22. a 7.24. Graz en tiempo real (Ratti, C.)



FIGURAS 7.25. a 7.27. La ciudad de Graz y modelización de su actividad a las 7:00 PM.

Fuente: Graz in real time. (Ratti, C.)





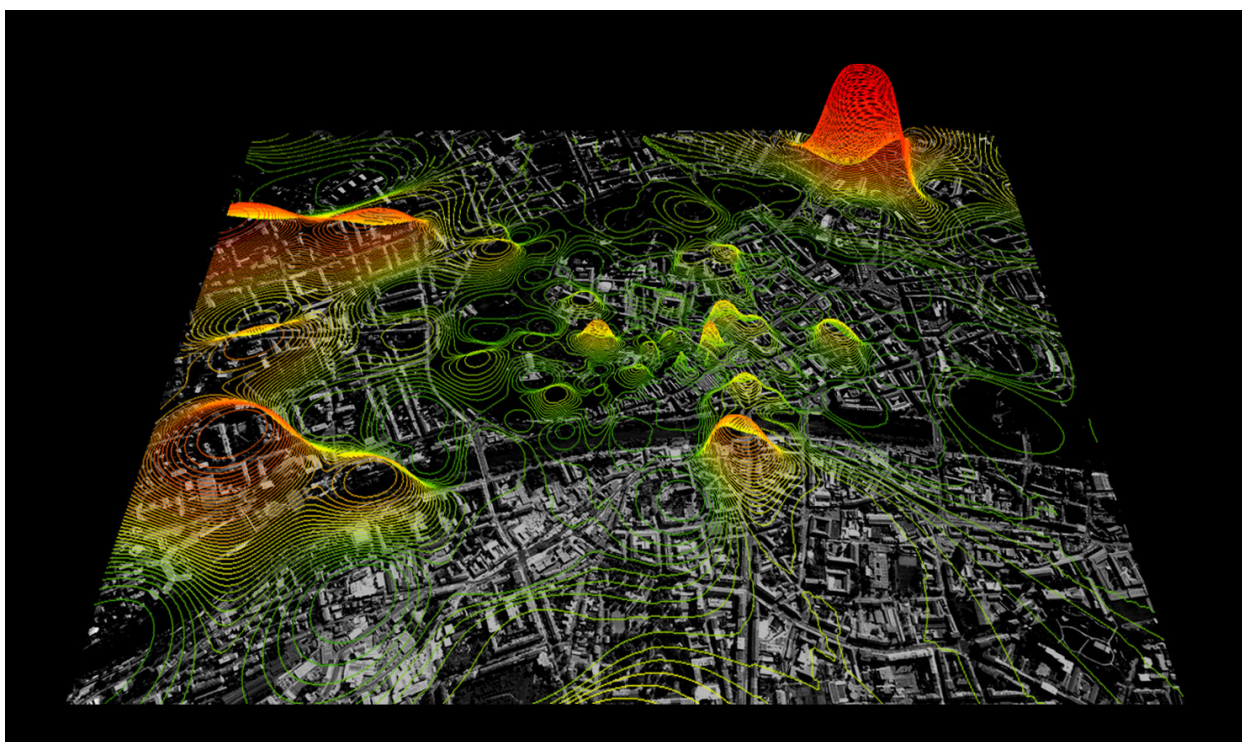
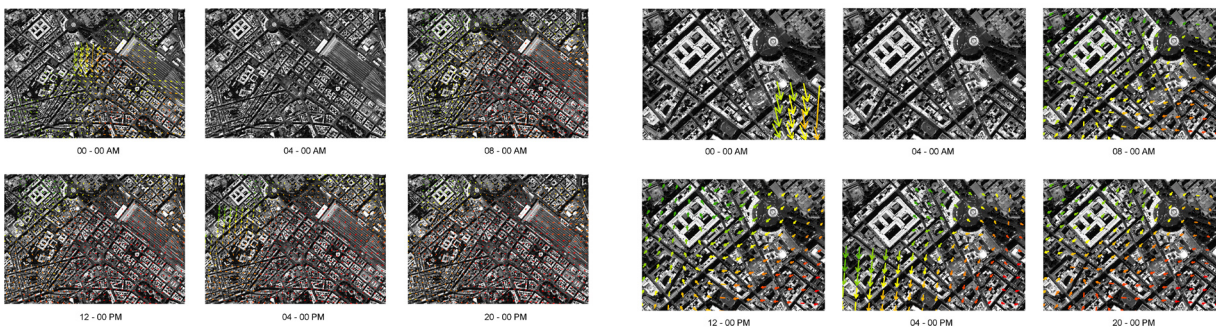
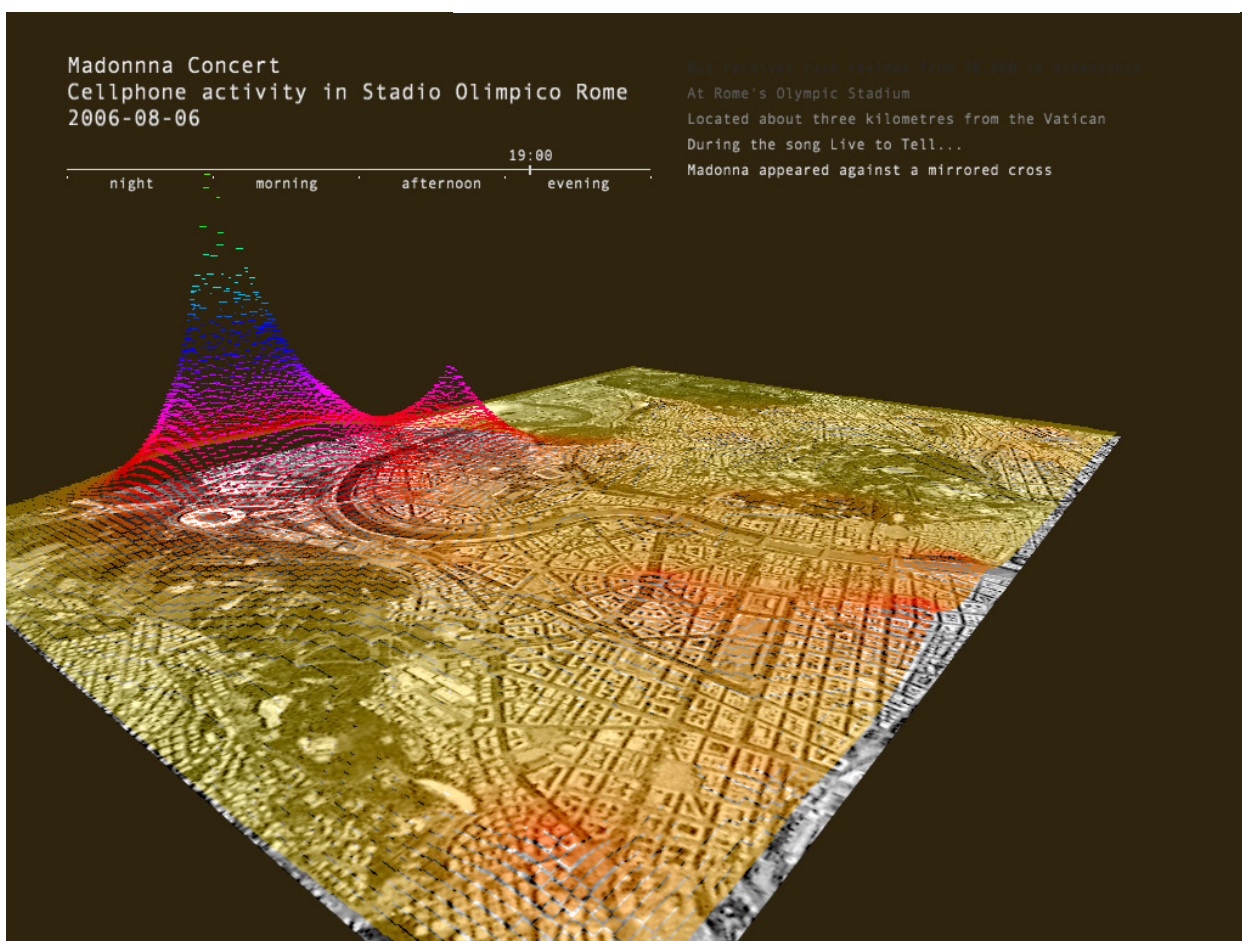
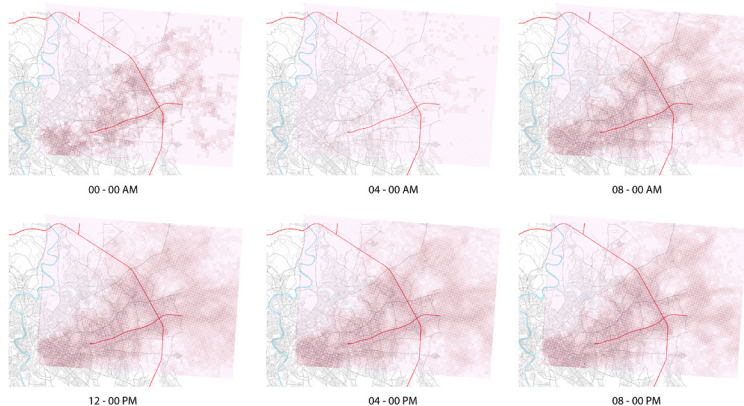
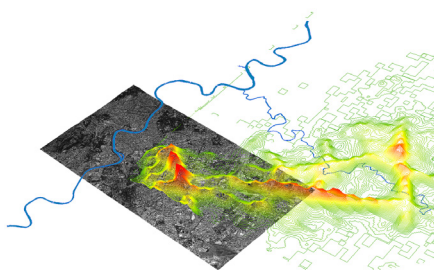
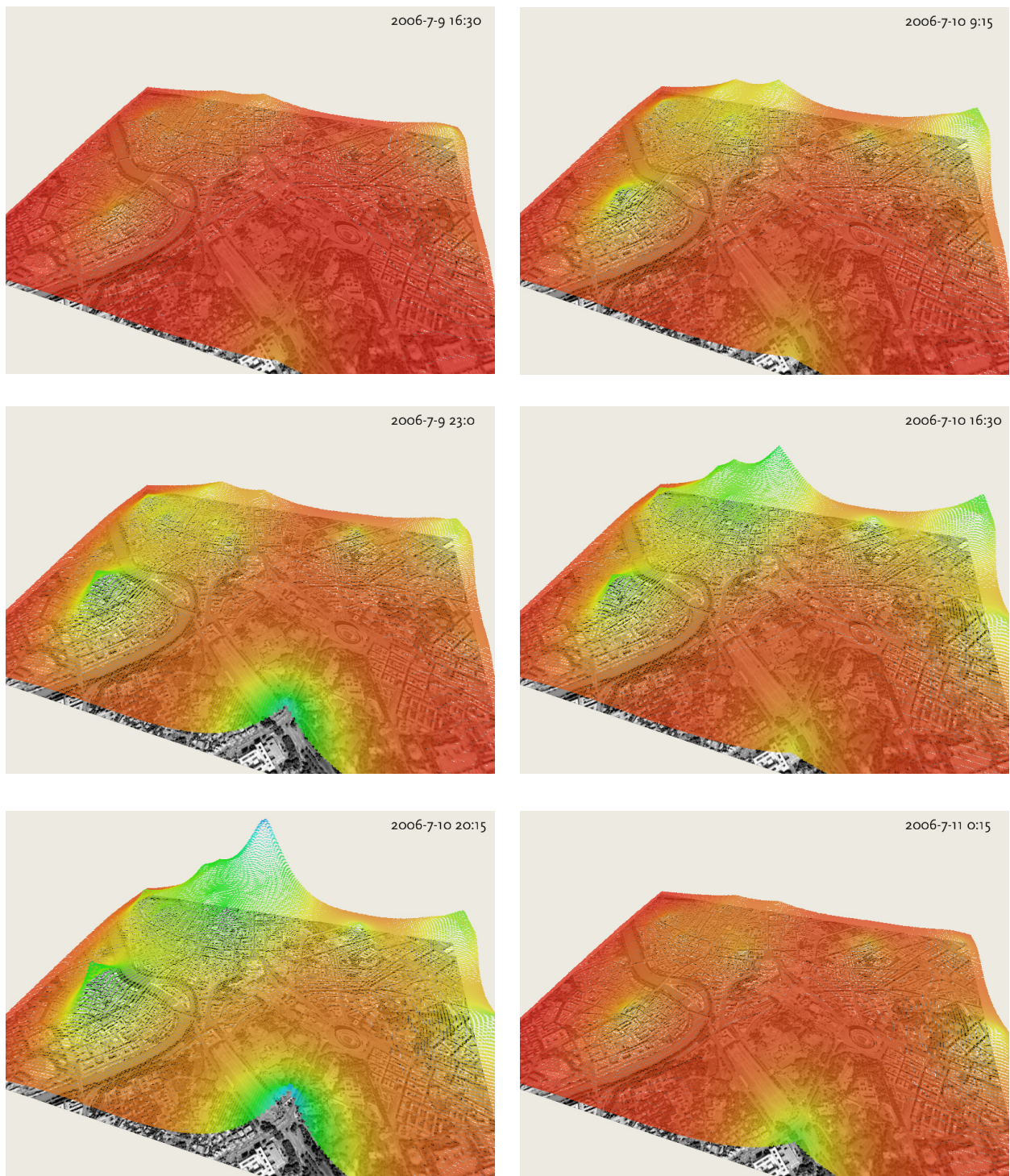
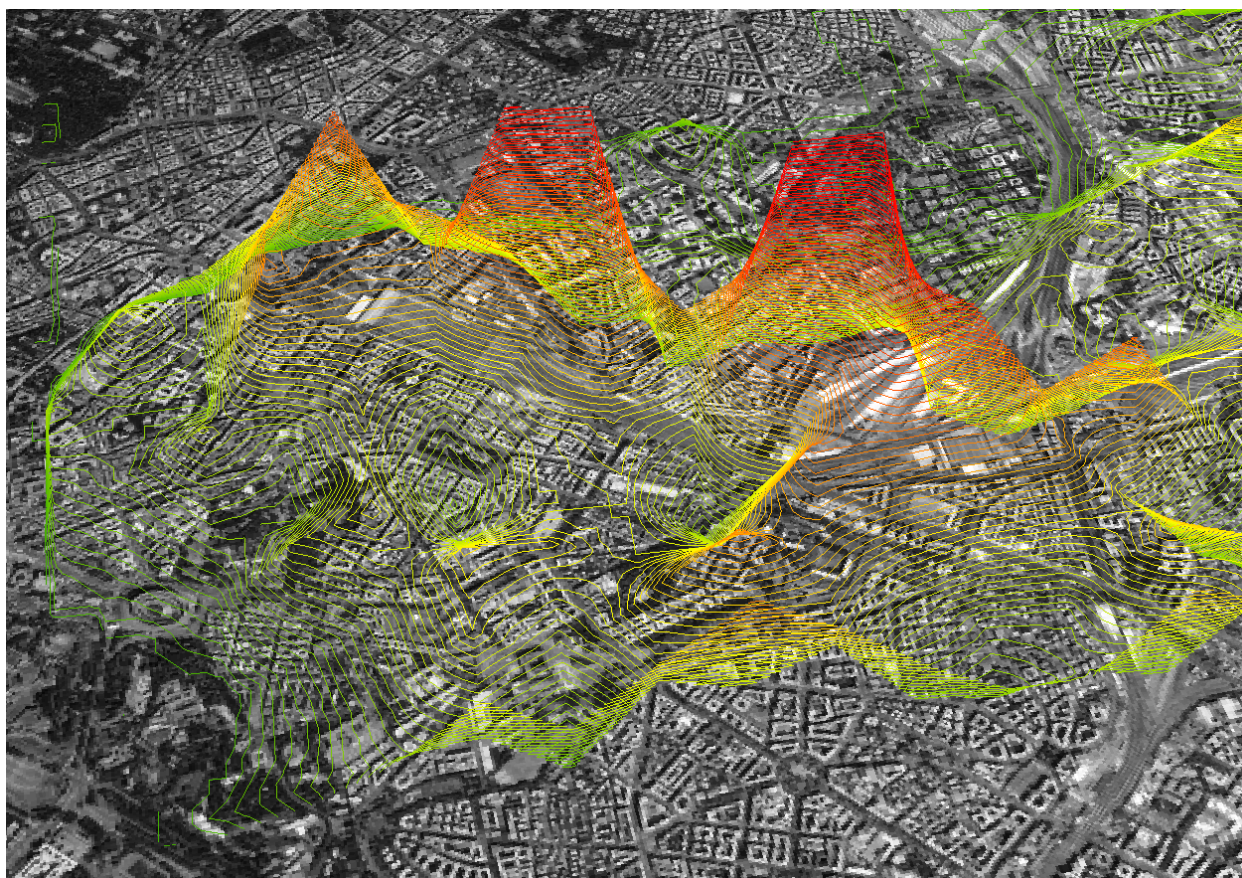


FIGURA 7.28 a 7.30 Graz en tiempo real. Evolucion de la densidad de llamadas en cada una de las franjas horarias. Fuente: Graz in real time. (Ratti, C.)





FIGURAS 7.30. a 7.36. Experiencias en la ciudad de Roma ante la final de la FIFA Worl Cup y en un macroconcierto de Madonna (2006). La dirección del moviento de los terminales móviles y la actividad de estos en seis instantes diferentes.



7.3. Cartografiando la actividad urbana. Una aplicación práctica en la ciudad de Almería.

7.3.1. Introducción

Como aplicación práctica de las metodologías expuestas hasta ahora en este capítulo se ha realizado una experiencia práctica para cartografiar la actividad en el centro de la ciudad de Almería utilizando la densidad de las llamadas telefónicas realizadas por sus ciudadanos desde terminales móviles, durante las 24 horas de un día laborable y otro festivo.

7.3.2. Datos de Partida

La cartografía base utilizada de la ciudad de Almería es la generada para el Plan General de Ordenación Urbana vigente. Los datos de partida son proporcionados por la operadora Movistar a partir de los registros de 28 estaciones base de telefonía GSM 900 (Global System for Mobile phone communications), con un espectro en el aire de 880 Mhz a 960 Mhz. Este estándar digital GSM,

perteneciente a la segunda generación de sistemas de telefonía, sustituyó a las comunicaciones analógicas en 1992 basando su funcionamiento en la transmisión de la información a través de conmutación de circuitos. Permite tanto llamadas telefónicas, contabilizadas en el momento del descolgado del abonado receptor, como mensajes cortos (Short Message Service o SMS). Quedan por tanto excluidas en este estudio los servicios ofrecidos por los sistemas UMTS (Universal Mobile Telecommunications System o tercera generación europea), tales como el acceso móvil a internet o los servicios multimedia.

La localización de las estaciones base y los gráficos proporcionados por la operadora entre los días 28 de Abril y 2 de Mayo de 2011 se muestran en las figuras 7.38 y 7.39.

7.3.3. Metodología

En una ciudad se debe de emplear una red integrada de estaciones base para proporcionar la suficiente cobertura de radio a todos los usuarios móviles. Los elementos más visibles de estas estaciones son las

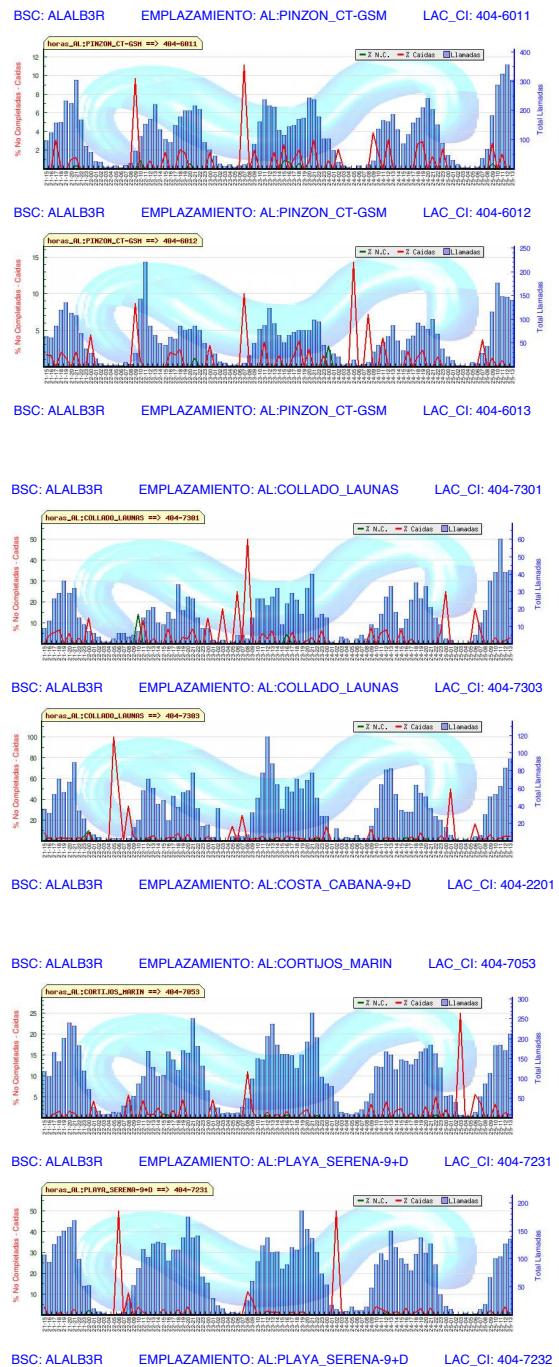
antenas, que emiten la energía electromagnética necesaria para establecer la comunicación con los usuarios que se encuentran en la cobertura de la estación base. Además de las antenas, la estación base está compuesta de transmisores y receptores para captar y contabilizar las señales de los terminales móviles.

La localización de las estaciones base se realiza a partir de las coordenadas geográficas proporcionadas (figura 7.39). Una vez georreferenciadas se procede a la parcelación del espacio en sus áreas de influencia. La cobertura de cada estación base varía según su potencia de salida pero en una ciudad es muy difícil de determinar pues influyen mucho las difracciones y reflexiones de la señal. Por consiguiente, para determinar el área de influencia de cada estación, se generaron los correspondientes polígonos de Thiessen que se muestran en la figura 7.40.

Cada estación base barre tres sectores de recepción de 120° cada uno, disponiendo de unas antenas orientadas a cada uno de ellos: norte geográfico, sureste y suroeste. En total se consideran 65 sectores con la información de las llamadas realizadas en intervalos de 1 hora recogidos durante una jornada laborable y otra festiva. Esta información alfanumérica se añade a la información espacial o geométrica mediante la unión de tablas de atributos. La base de datos generada contiene finalmente un dato que refleja el volumen de llamadas realizadas desde cada uno de los sectores cubiertos por cada estación base, para cada intervalo temporal.

7.3.4. Resultados

El proceso de grafado de la información georreferenciada es realizado en formato vectorial, asignando al polígono que representa cada sector el valor de la densidad de llamadas generadas obtenido de la relación entre la información de partida y su superficie. Se ensayan varias salidas gráficas, en dos y tres dimensiones, realizándose un proceso de extrusión de la cartografía base en función de estos valores de “actividad” y comparando estos resultados con la imagen 3d real de la ciudad en función del número de

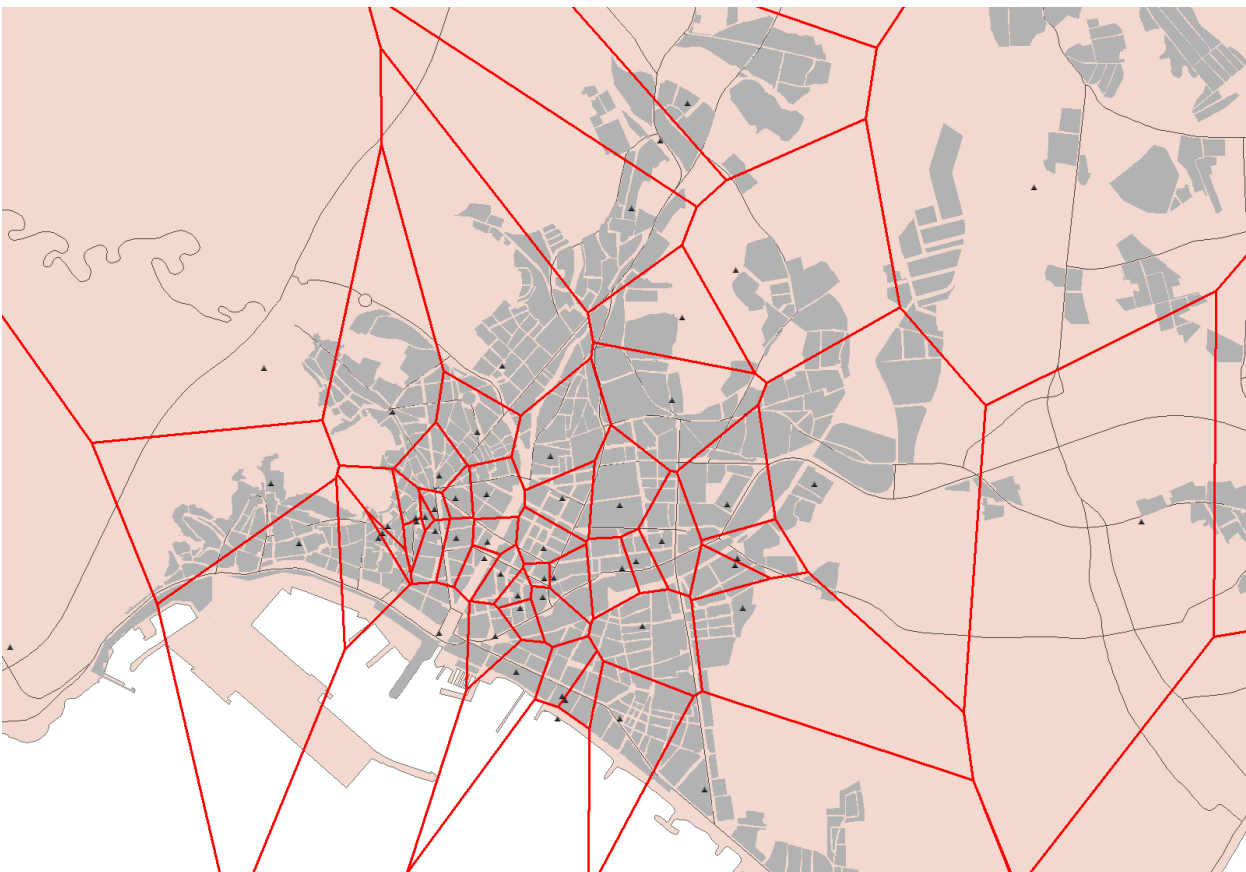


FIGURAS 7.37 y 7.38. Gráficas de las llamadas realizadas para cada una de las franjas horarias (intervalo de 1 hora)



FIGURA 7.39. Localización de las estaciones base sobre ortofotografía aérea. Fuente: kml sobre Google earth

FIGURA 7.40. Polígonos de Thiessen de las estaciones base en la ciudad de Almería



plantas de sus edificios. diferentes superficies generadas para cada franja horaria permiten tambien la ilustración en base a isolíneas de actividad urbana.

Ejemplos de estas cartografías se muestran a continuación en las Figuras 7.41 a 7.43

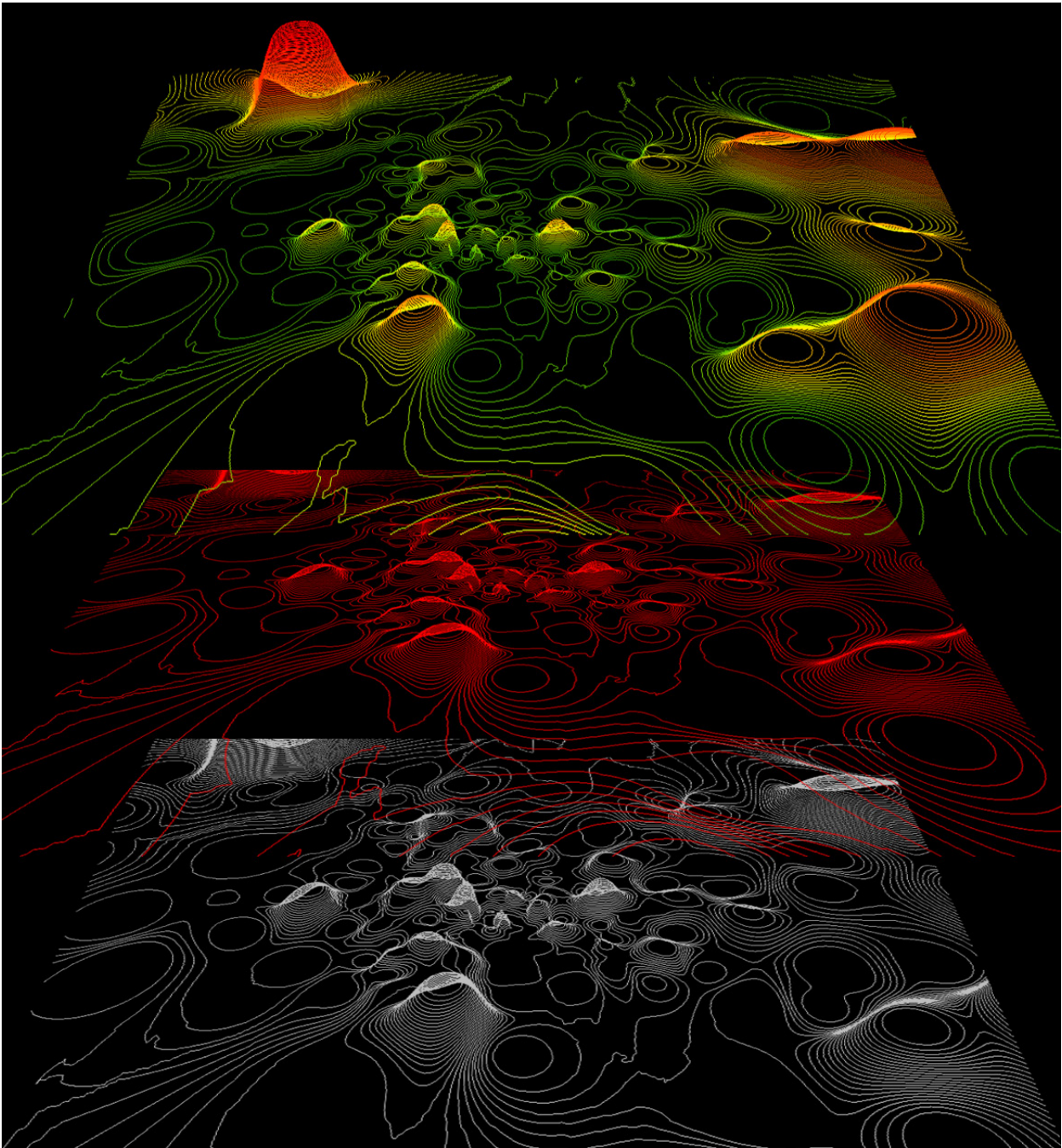
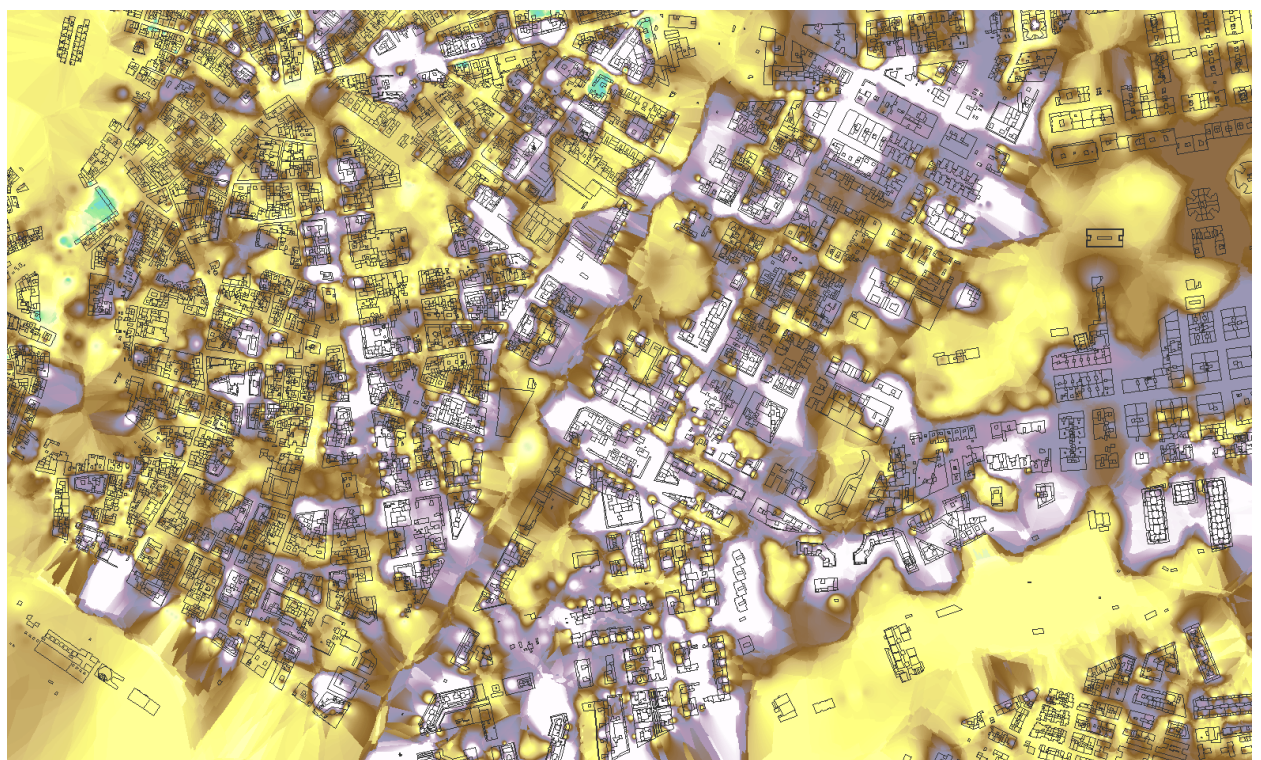


FIGURA 7.41. Isolíneas de actividad generadas a partir de un modelo digital de terreno de la variable “densidad de llamadas”.



FIGURA 7.42. Proceso de asignación de alturas de edificación a las manzanas de la ciudad de Almería. Elaboración propia.

FIGURA 7.43. modelo digital de terreno resultado de modelizar la densidad de llamadas realizadas en una hora en el centro de la ciudad de Almería. Elaboración propia.



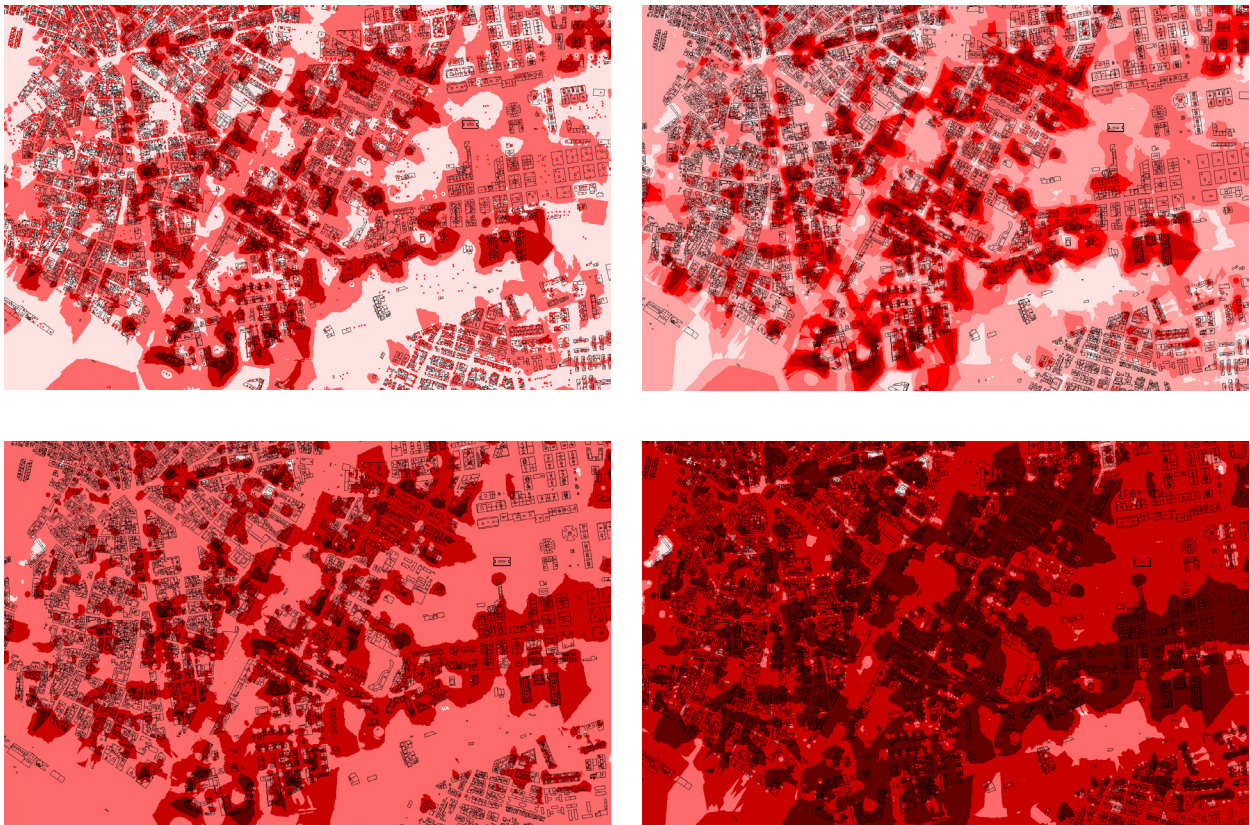


FIGURA 7.44. Evolución temporal de la densidad de llamadas telefónicas en la ciudad de Almería

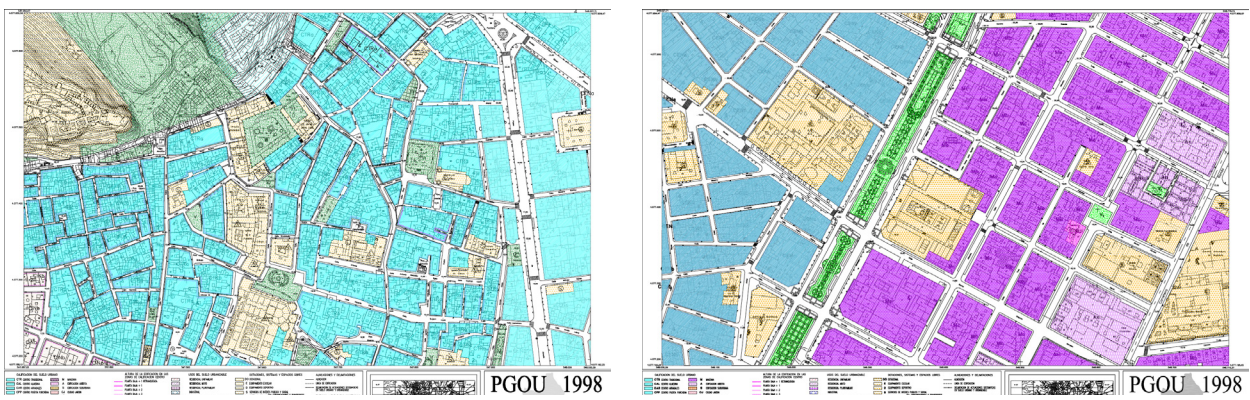


FIGURA 7.45. Cartografías “estáticas” del Plan General de Ordenación Urbana de Almería

7.4. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos no resulta complicado argumentar la utilidad práctica que estas cartografías pueden aportar en el campo de la planificación urbana.

La imagen de la ciudad estática de bordes definidos y espacios acotados deja paso a una nueva percepción del fenómeno urbano que desvela la actividad ciudadana de una forma viva y dinámica. Los patrones de desplazamiento cotidiano en el interior de las ciudades, el uso espacial y social de las calles y barrios y en general la observación de sus flujos internos puede ser un medio para entender el presente de las ciudades y anticipar problemáticas futuras.

Aproximándose a la variable temporal a esta escala, descubriendo tantas ciudades diferentes como instantes de tiempo sean considerados, será posible una mejor lectura de los procesos que en ella se producen abriendo nuevas posibilidades a los estudios de planificación urbanística.

CAPITULO 8

Taller de planificación territorial mediante Sistemas de Información Geográfica: Una aplicación docente en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Granada.....297

8.1. Introducción.

8.2. Una aplicación docente en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada.

8.2.1. Objetivos.

8.2.2. Desarrollo de la experiencia.

8.2.3. Metodología aplicada.

8.2.4. Resultados y conclusiones.

8.3. Evolución del proyecto y retos de futuro.

8.3.1. Taller de planificación: Análisis territorial mediante SIG.

8.3.2. Sistemas de Información Geográfica y Visualización.

8.3.3. Un proyecto de Innovación Docente.

8.3.4. Máster Universitario en Urbanismo.

8 TALLER DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: UNA APLICACIÓN DOCENTE EN LA E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS DE GRANADA.

Resumen

El Área de Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Universidad de Granada, coordinada por el profesor J. L. Gómez Ordóñez, propone, para la formación de los Ingenieros de Caminos, una experiencia de reconocimiento y análisis territorial en el curso académico 2004/2005, en el que la conversión de una asignatura anual en dos cuatrimestrales, “Urbanística y Ordenación del Territorio” y “Urbanismo”, hizo posible la introducción de una innovadora metodología docente para las clases prácticas. El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta para la manipulación de cartografía e información georreferenciada fue el pilar básico de la nueva propuesta.

Este proyecto ha ido madurando y afianzándose hasta culminar con la creación de una nueva asignatura, en un principio de libre configuración específica y actualmente englobada como optativa en el nuevo plan de estudios. La reciente aprobación de un proyecto de innovación docente y la inclusión de dos asignaturas en el Máster Universitario en Urbanismo por la Universidad de Granada dan una idea de la evolución de esta experiencia y de los retos a afrontar en un inmediato futuro.

8.1. Introducción.

La presente tesis doctoral no estaría completa si faltara este capítulo, en el que se relata la experiencia de trasladar esta preocupación, la de la representación de los procesos y flujos que interesan a ingenieros, arquitectos, ambientólogos y geógrafos, a los alumnos de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Granada.

En estos diez intensos años de incansable formación, investigación, docencia y trabajo profesional, el objetivo no ha sido otro que el de facilitar el aprendizaje del alumnado, de poner a su disposición los recursos y herramientas necesarias para la mejor realización de sus trabajos y proyectos de fin de carrera y una vez terminada su formación facilitar su incorporación al mercado de trabajo. Y es que en los sectores que tradicionalmente emplean ingenieros de caminos, aparecen cada vez más demandas de profesionales especializados en planificación y ordenación del territorio, conservación, mantenimiento y rehabilitación de obras, gestión de los recursos naturales, gestión y manipulación de grandes volúmenes de datos georreferenciados, gestión ambiental,... La cantidad de información necesaria y actualmente disponible para la gestión territorial es enorme y difícil de manejar, lo que genera la necesidad de titulados con estos conocimientos y destrezas.

El departamento de Expresión Gráfica de la Universidad de Granada y más concretamente el Área de Urbanismo y Ordenación del Territorio, adscrita a él hasta hace apenas un mes, plantea esta experiencia de reconocimiento y análisis territorial en un curso académico muy especial, el 2004/2005, en el que el cambio de plan de estudios de la titulación de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, llega su tercer curso.

La conversión de la asignatura “Planificación Urbanística y Ordenación del Territorio” (4º curso) en dos asignaturas cuatrimestrales, “Urbanística y Ordenación del Territorio” (1º cuatr.) y “Urbanismo” (2º cuatr.) hace posible la introducción de una innovadora metodología docente cuyo objetivo principal fue el de acercar a los alumnos las nuevas tecnologías que tanta importancia están tomando en los procesos de planificación en todo el mundo.

Conservando los principios básicos de la Ordenación del

Territorio, se planteó un cambio de metodología en la enseñanza práctica de esta asignatura, facilitando un primer contacto del alumno con la cartografía digital y el uso de las herramientas propias de los S.I.G.

Este capítulo muestra los objetivos a alcanzar, la metodología utilizada, las dificultades encontradas en el proceso y los resultados obtenidos de esta experiencia, que debido a su éxito, se ha incorporado al área de conocimiento como un referente y una seña de identidad.

8.2. Una experiencia docente en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada.

Se pretende que los estudiantes de Ingeniería de Caminos se ejerciten en el ámbito de la Planificación Territorial y Urbana, enfatizando aquellas dimensiones más relacionadas con su futura práctica profesional. Es decir, se abordan unas prácticas de esta disciplina en territorios extensos y plurimunicipales (Áreas Metropolitanas / Subregiones) desde la dimensión territorial del agua, en la ordenación de sus cauces fluviales, y desde la organización de la movilidad y sus efectos territoriales y urbanos, en una práctica más general e integrada. Para ello se plantea un taller práctico de planificación territorial atendiendo, con la perspectiva ulterior de la ordenación del ámbito, al reconocimiento y análisis de los cuatro subsistemas que lo articulan: el medio físico, las infraestructuras, la ocupación de suelo y los espacios libres.

8.2.1. Objetivos.

Entre los objetivos perseguidos con esta experiencia destaca el hecho de facilitar el primer contacto del alumno con la cartografía digital, con las fuentes y recursos cartográficos que internet pone actualmente en nuestras manos y dar respuesta a las exigencias del alumnado en el ámbito de las nuevas tecnologías de la información.

La iniciación, desde una perspectiva eminentemente práctica, en los conceptos, fundamentos y nuevas técnicas analíticas propias de los Sistemas de Información

Geográfica que permitan la mejor comprensión de los contenidos teóricos de la asignatura.

La realización de cartografías temáticas, para la mejor lectura del territorio, y propositivas, para la plasmación efectiva de las propuestas de ordenación territorial.

El fomento de las habilidades necesarias para el desarrollo de un trabajo en grupo, mejora de la expresión oral y de la capacidad expositiva del alumno.

8.2.2. Desarrollo de la experiencia

Tomando como ámbito de estudio el litoral granadino, se propuso la realización de un ejercicio basado en el reconocimiento y análisis de los cuatro grandes subsistemas que articulan el territorio: el medio físico, las infraestructuras, la ocupación de suelo y los espacios libres. Se detectaron y cartografiaron límites y discontinuidades, cambios de gradiente, secuencias y permanencias, mutaciones, hitos diferenciados y áreas homogéneas, jerarquías y conexiones, procesos de expansión y de contracción. Se establecieron relaciones causales entre elementos del territorio, y se diagnosticaron problemas, disfunciones, fortalezas, oportunidades y amenazas, y todo ello bajo el entorno de los S.I.G.

La primera parte del curso abordó la relación agua-territorio. Los alumnos, para ejercitar ese aprendizaje, fijaron su atención sobre uno de los ámbitos territoriales que, en el área litoral granadina, tienen como referencias centrales los cauces del sistema río Verde- río Jate, del río Guadalfeo y la Vega de Motril, de la rambla del Puntaón y los Llanos de Carchuna.

Una vez definido el ámbito territorial de la cuenca a escala 1:20.000, se fueron estableciendo los objetivos que orientarían las futuras propuestas.

La fase preliminar del ejercicio se orientó al reconocimiento o análisis del territorio objeto del trabajo a esta escala y atendió, con la perspectiva ulterior de la ordenación del ámbito (es decir, la gestación de unas primeras intuiciones de ordenación y proyecto), al estudio de cuatro subsistemas que articulan globalmente el sistema territorial: el del medio físico (relieve: pendientes y orientaciones, hidrografía, formas litorales...), el de las infraestructuras (red, estructura jerárquica y conec-

tiva...), el de los espacios libres y de la ocupación de suelo (usos del suelo, hitos visuales y elementos fundamentales del paisaje...).

Se realizó posteriormente un análisis del territorio más detallado, en un ámbito específico asignado, sobre un plano a escala 1:10.000, siendo necesaria la actualización de la cartografía base mediante ortofotografías aéreas y con un profundo trabajo de campo. Se trató de captar en ese plano la importancia de fenómenos y procesos que exigen la mirada simultánea a escalas mayores y menores, por ejemplo un muro de encauzamiento ó ciertas condiciones de la cuenca aguas arriba de las presas, y que registre los rasgos dominantes y característicos del paisaje:

- Geomorfología del cauce, de las laderas y del valle.
- Morfología parcelaria.
- Red de caminos y acequias.
- Usos del suelo.
- Elementos patrimoniales y de identidad territorial.
- El carácter de los valles y de las respectivas llanuras aluviales. Las conexiones entre ellos. El paisaje a lo largo de los mismos.

Se detectaron y cartografiaron límites y discontinuidades (cambios de gradiente, barreras, límites permeables...), secuencias y permanencias, mutaciones, hitos diferenciados y áreas homogéneas, jerarquías y conexiones, procesos de expansión y de contracción, fragilidades (acuíferos, espacios amenazados...).

Se establecieron relaciones causales entre elementos del territorio, por ejemplo embalse-vegetación de ribera-caminos y vados-agricultura-urbanización, densidad de población-pendiente. Ayudó en este análisis la comparación del territorio en dos momentos temporales distanciados algunas decenas de años. También se propuso el recorrido a lo largo del cauce y la realización de croquis o fotografías, así como una aproximación al régimen de avenidas.

A partir del análisis anterior, se diagnosticaron problemas, disfunciones, fortalezas, oportunidades, amenazas: Atendiendo a aspectos como erosión, estabilidad de riberas, contaminación, inundabilidad, paseo, baño, disfrute de la naturaleza, pesca, extracción de áridos, oscilaciones del manto freático, conducciones de agua

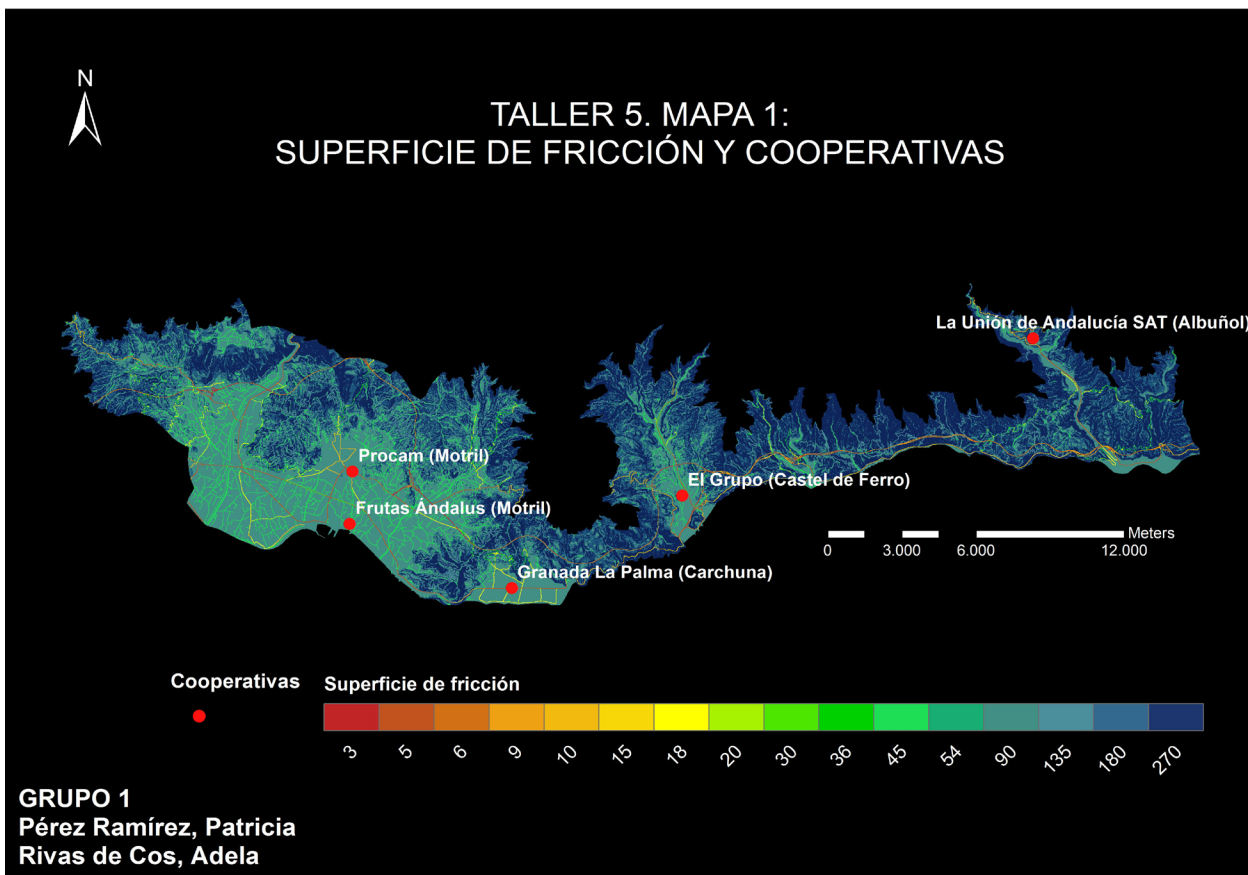
y electricidad, irrupción del automóvil... Todo ello se recogió en un plano síntesis que muestra los aspectos identificados, así como la distinción de tramos homogéneos, por tipos o unidades de paisaje, según sus características naturales y culturales, que serán la base de posteriores estrategias de actuación.

En una última fase se definieron (a escala 1:20.000, pero con el detalle de la 10.000) la propuesta de Sistema de Espacios Libres Litoral y, con relación a él, se detallaron (a escala 1:5.000) las propuestas de ordenación de los corredores hídricos que se consideraron oportunas, relacionadas con el diagnóstico efectuado. Entre ellas se tuvo que encajar una urbanización moderada (aprox. 1000 viviendas) y un crecimiento de un parque industrial de 10 Ha, así como la propuesta de elementos que contribuyan a la ubicación de un gran parque fluvial-natural, fundamentalmente relativas a la conexión del sistema urbano con el corredor; a las posibilidades de naturalización de tramos degradados; sobre la disposición de caminos para pasear, para observar la naturaleza, etc.; lugares de ocio y recreo y de instalación de servicios, de información, de hostelería..., todo ello a la vista de los regímenes de avenidas y de las oportunidades del territorio.

8.2.3. Metodología aplicada:

Tras la exposición de los contenidos teóricos y el planteamiento de los ejercicios prácticos para su desarrollo en grupos de cuatro alumnos se impartieron unas calculadas clases sobre los fundamentos de los SIG, las bases de datos y la cartografía digital, que dieron paso a ejemplos prácticos en aula informática ya con manejo del software ArcView. La utilización de los modelos digitales de terreno y de sus cartografías derivadas, las capacidades de superposición y reclasificación, las consultas a la base de datos, la edición de nuevas capas de información y gran parte de las herramientas de geoprocésamiento, fueron la base de estas clases prácticas.

Paralelamente y a lo largo del cuatrimestre se organizaron varios cursos de iniciación a los SIG, unos gestionados por Centro de Formación Continua de la Universidad de Granada y abiertos a varias titulaciones, y otros a petición de la delegación de alumnos de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. de Granada, así como tutorías



personalizadas y en grupo, vía web y presenciales en horario no lectivo.

Como síntesis de la práctica, los trabajos se integran en una propuesta global de ordenación del territorio del ámbito elegido (Figuras 7.1 a 7.6).

La valoración de las cartografía presentadas se realizó mediante exposición pública, que permitió la puesta en común de los paneles resumen realizados por los diferentes equipos.

Finalmente se realizó una encuesta de satisfacción anónima donde el alumnado pudo expresar sus impresiones sobre la nueva metodología aplicada.

8.2.4. Resultados y conclusiones

La primera experiencia fue muy satisfactoria. La incertidumbre ante un cambio tan sustancial, en el que los alumnos deben enfrentarse al manejo de un complejo

software, se transformó en satisfacción por la calidad de los trabajos y paneles resumen, que hicieron posible la presentación de los mejores proyectos al Concurso de la Asociación de Ingenieros y la posterior exposición de los trabajos premiados. Los resultados fueron inmejorables, el esfuerzo de profesores y alumnos en una tarea tan ilusionante como complicada dio sus frutos, y las encuestas finales corroboraron las impresiones generales.

Entre las dificultades encontradas en el camino se pueden destacar las relacionadas con el elevado número de alumnos y la necesidad de equipos informáticos y aulas apropiadas, que se solucionó en parte con el uso de un portátil por grupo, y las derivadas del aprendizaje previo de un nuevo software en el reducido espacio temporal de un cuatrimestre. Este último aspecto y el especial interés que despierta en el alumnado esta herramienta pueden propiciar una mayor preocupación, descompensada en ocasiones, por el manejo del software que por la aplicación práctica de los conocimientos teóricos adquiridos.

Sin embargo, a pesar de las normales dificultades, a lo largo de estos seis cursos se ha percibido la mejor comprensión de los contenidos teóricos y la mejora sustancial en la calidad de los trabajos prácticos, de los que aquí se recoge una muestra (Figuras 8.1 a 8.x), así como un notable entusiasmo y participación del alumnado.

Esta experiencia ha sido el origen de varias comunicaciones como las presentadas en las “Primeras jornadas sobre innovación docente y adaptación al EEES en la titulaciones técnicas” (Granada, septiembre de 2010), o en el Congreso de innovación “Presente y futuro en la docencia universitaria” (Huelva, octubre de 2009)

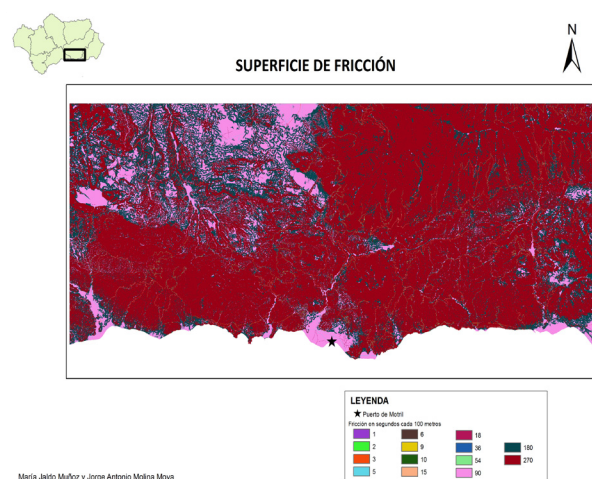
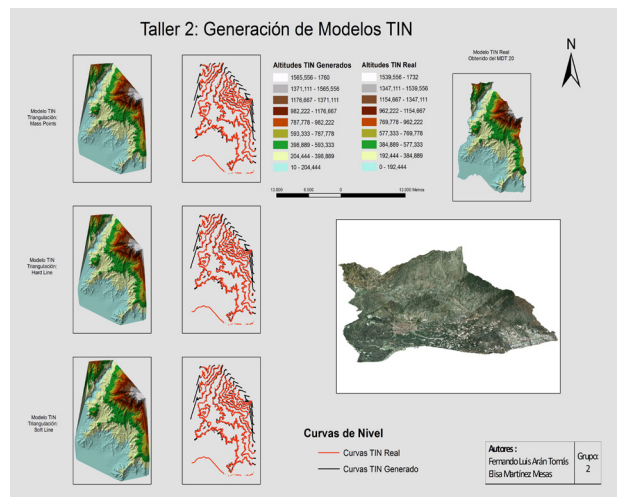
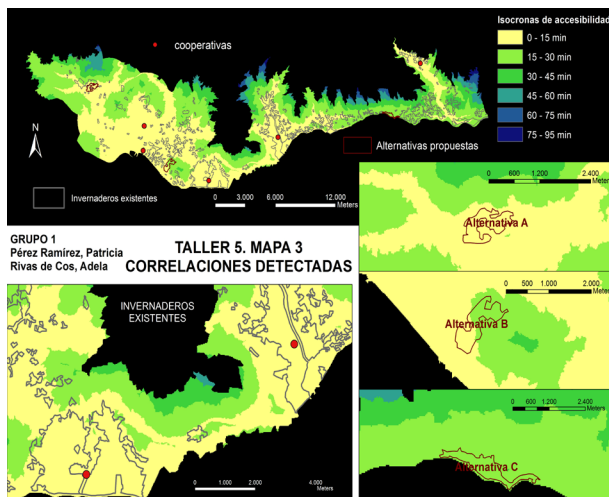
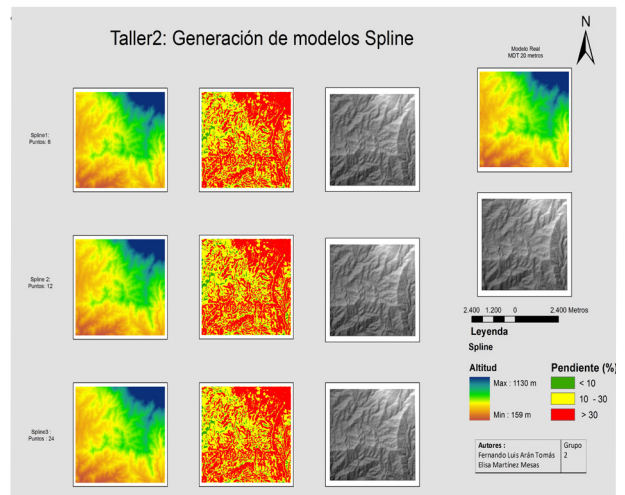


FIGURA 7.2. a 7.6

8.3. Evolución del proyecto y retos de futuro

Esta experiencia fue madurando en cursos sucesivos, cambiando de ámbito de estudio, pasando de la costa al ámbito metropolitano o al corredor de la A-92 prestando atención a la ordenación de corredores fluviales y del sistema de espacios libres, a la movilidad metropolitana, o a las grandes infraestructuras de comunicación.

En el curso académico 2006/2007 surge la necesidad de avanzar en otro de los frentes abiertos desde el curso académico 2002/2003: Los cursos denominados “Aplicación a la planificación territorial, ambiental e infraestructural de los sistemas de Información Geográfica” del centro de formación continua de la Universidad de Granada, de 40 horas de duración y de los que se impartieron 4 ediciones. El avance no fue otro que el de la oferta de una nueva asignatura de libre configuración específica: “Taller de Planificación: Análisis territorial mediante Sistemas de Información Geográfica”, que complementa y amplía los conocimientos prácticos de las asignaturas troncales y que pone fin a los cursos de formación continua.

8.3.1. Taller de Planificación: Análisis territorial mediante Sistemas de Información Geográfica

Esta asignatura orientada a alumnos de segundo ciclo, pretende:

- Iniciar al alumnado, desde una perspectiva práctica, en los conceptos y fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica y en sus múltiples aplicaciones al proceso de la planificación.
- Dotar al alumnado de una formación adicional y complementaria en el área de conocimiento de la ordenación territorial y urbana.
- Capacitar al alumnado en el manejo de herramientas que le permitan gestionar la cantidad de información a la que actualmente tiene acceso y que le ayuden en el proceso de toma de decisiones.
- Familiarizar a los alumnos en el empleo de los SIG, tanto en el análisis de los datos geográficos, como en la generación de cartografía temática.

- Desarrollar la destreza del alumnado en el manejo de los instrumentos informáticos necesarios para el desarrollo de su ejercicio profesional en el ámbito de la planificación.

Partiendo de una introducción a las funcionalidades más básicas de los SIG, se lleva a cabo un recorrido tanto teórico como práctico por sus distintas aplicaciones en cada una de las etapas del proceso de planificación. Al superar la asignatura, el alumno es capaz de aplicar las herramientas de análisis espacial que proporcionan los SIG para crear una base de datos cartográfica, realizar consultas complejas a la base de datos, manipular y generar cartografía temática, generar modelos digitales de terreno mediante diferentes técnicas de interpolación y cartografías derivadas de pendientes y orientaciones, realizar análisis de intervisibilidad, hidrológicos, de accesibilidad y de correlación espacial de variables y como objetivo último profundizar en la fase de diagnóstico mediante técnicas de modelado espacial, evaluación multicriterio y generación de escenarios futuros.

Programa:

- Tema 1. Los Sistemas de Información Geográfica en la Ordenación del Territorio: Conceptos básicos: antecedentes y evolución. Los datos geográficos y su estructura: aproximación vectorial y aproximación ráster. Bases de datos relacionales: la componente temática. (6 horas)
- Tema 2. Fuentes de información digital: Cartografía y SIG. Sistemas de coordenadas y georreferenciación. Cartografía vectorial, ortofotografía e imágenes de satélite. (6 horas)
- Tema 3. Análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica: Herramientas de análisis vectorial. Herramientas de análisis raster. El análisis espacial en la planificación. Técnicas de interpolación espacial: Modelos digitales de terreno (12 horas)
- Tema 4. Los SIG en el proyecto de planificación territorial: Metodología y práctica en el proceso de la planificación. Fases y escalas de trabajo. (4 horas)
- Tema 5. Aplicaciones en la fase de análisis territorial. Procesado del MDT para el análisis hidrológico. Superficies de fricción: gradiente de accesibilidad. Cambio

en los usos del suelo y dinámica paisajística. Análisis urbano. (16 horas)

• Tema 6. Aplicaciones en la fase de diagnóstico. Descripción y análisis de correlaciones espaciales. Metodologías de valoración de la capacidad de acogida. (8 horas)

• Tema 7. Propuestas y selección de alternativas. El proceso de toma de decisiones: Los métodos de evaluación y decisión multicriterio. Análisis de incertidumbre en los procesos multicriterio. Generación y valoración de escenarios futuros. (8 horas)

Talleres Prácticos:

Taller 1: Visualización, manipulación y edición de datos geográficos. Exploración de los datos y creación de una geodatabase personal. Servidores WMS.

Taller 2: Técnicas de Interpolación. Generación de un MDT y de cartografías derivadas. Análisis de Intervisibilidad.

Taller 3: Delimitación del Ámbito de estudio e identificación de unidades ambientales.

Taller 4: Análisis de accesibilidad. Análisis hidrológico.

Taller 5: Análisis de correlación espaciales de variables.

Taller 6: Capacidad de acogida del Territorio

Taller 7: Selección de alternativas: Evaluación multicriterio.

La ficha de la asignatura, los contenidos y la resolución de estos talleres así como un manual de iniciación al manejo del software ArcGis, son proporcionados a los alumnos (en acceso abierto) desde la página web del laboratorio de Urbanismo y Ordenación del Territorio en los enlaces:

www.urbanismogranada.com/descargas.php y

www.urbanismogranada.com/manuales.php

Actualmente estos contenidos se acaban de incorporar al nuevo plan de estudios del Grado en Ingeniería Civil (resolución del 4 de Febrero de 2011), cumpliendo con las directrices que marca el Espacio Europeo de Ense-

ñanza Superior (EEES). La nueva denominación de la asignatura es, "Sistemas de Información Geográfica y Visualización" de 6 ECTS y se enmarca en el módulo de optatividad común para ser cursada en el cuarto curso.

8.3.2. Sistemas de Información Geográfica y Visualización

Esta nueva asignatura optativa fusiona dos asignaturas de libre configuración de especial atracción para el alumnado: "Taller de Planificación" e "Ingeniería Gráfica" impartidas por el mismo departamento pero adscritas a distintas áreas de conocimiento.

A continuación se realiza una descripción de sus contenidos, objetivos y metodología docente.

Breve descripción de los contenidos:

- Los Sistemas de Información Geográfica en la planificación territorial y urbana, las bases de datos territoriales y su aplicación a la Ingeniería Civil.

- Infraestructuras de datos espaciales, cartografía digital y bases de datos en el ámbito de la planificación.

- Modelos digitales de terreno.

- Simbolización y cartografía temática.

- Ubicación óptima de infraestructuras.

- Modelos de crecimiento urbano y territorial, aplicaciones a la planificación de las infraestructuras de transporte y a la planificación hidrológica.

- El Diseño gráfico asistido por ordenador y la visualización tridimensional de las obras públicas.

- Aplicaciones CAD en la ingeniería civil. Bases teóricas de la generación de modelos 3D. Herramientas de dibujo, modelado, texturización e iluminación de las obras públicas. Procesos de renderizado y postproducción.

- Presentación de proyectos de ingeniería civil y marketing gráfico.

Competencias generales y específicas

CG6. Capacidad para la realización de estudios de planificación territorial y de los aspectos medioambientales relacionados con las infraestructuras, en su ámbito.

CB2. Capacidad de visión espacial y conocimiento de las técnicas de representación gráfica, tanto por métodos tradicionales de geometría métrica y geometría descriptiva, como mediante las aplicaciones de diseño asistido por ordenador.

CB3. Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.

CTSU4. Conocimiento de la influencia de las infraestructuras en la ordenación del territorio y para participar en la urbanización del espacio público urbano, tales como distribución de agua, saneamiento, gestión de residuos, sistemas de transporte, tráfico, iluminación, etc.

Objetivos

- Adquirir conocimientos básicos sobre las aplicaciones de los Sistemas de información geográfica (SIG) en el ámbito de la planificación territorial y urbana y sobre los programas de diseño asistido por ordenador (CAD) y visualización tridimensional de las obras públicas.
- Adquirir conocimientos básicos sobre cartografía digital, modelos de datos, infraestructuras de datos espaciales y bases de datos territoriales.
- Capacidad para aplicar las herramientas SIG para resolver problemas de planificación territorial, infraestructural y urbanística.
- Capacidad para aplicar las herramientas Cad y de modelización 3D en la visualización de proyectos y obras públicas.

Temario:

Temario Teórico: Cada tema ocupará 2 horas correspondientes a las Sesiones Teóricas presenciales, por lo que este Temario se impartirá en un total de 10 horas.

Tema 1. Los Sistemas de Información Geográfica en la Or-

denación del Territorio: Conceptos básicos: antecedentes y evolución. Los datos geográficos y su estructura: aproximación vectorial y aproximación ráster. Bases de datos relacionales: la componente temática.

Tema 2. Fuentes de información digital: Cartografía y SIG. Sistemas de coordenadas y georreferenciación. Cartografía vectorial, ortofotografía e imágenes de satélite. Metadatos. Servicios OGC y Web Map Services.

Tema 3. Análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica: Herramientas de análisis vectorial. Herramientas de análisis raster. El análisis espacial en la planificación territorial. Técnicas de interpolación espacial: Modelos digitales de terreno en la representación del territorio.

Tema 4. Los SIG en el proyecto de planificación territorial: Metodología y práctica en el proceso de la planificación. Fases y escalas de trabajo. Aplicaciones en la fase de análisis territorial. Procesado del MDT para el análisis hidrológico. Superficies de fricción: gradiente de accesibilidad. Cambio en los usos del suelo y dinámica paisajística. Análisis urbano.

Tema 5. Aplicaciones en la fase de diagnóstico. Descripción y análisis de correlaciones espaciales. Metodologías de valoración de la capacidad de acogida.

Tema 6. Propuestas y selección de alternativas. El proceso de toma de decisiones: Los métodos de evaluación y decisión multicriterio. Análisis de incertidumbre en los procesos multicriterio. Generación y valoración de escenarios futuros.

Tema 7. Diseño gráfico asistido por ordenador y visualización tridimensional de las obras públicas. Fundamentos de AutoCAD y aplicaciones a la Ingeniería civil.

Tema 8. Bases teóricas de la generación de modelos 3D. Herramientas de dibujo y modelado 3D. Edición.

Tema 9. Cámaras, iluminación virtual y renderizado de la obra pública. Procesos de renderizado y postproducción de la imagen digital.

Tema 10. Diseño y presentación de proyectos de ingeniería y marketing gráfico. Animación.

Temario Práctico: Talleres.

Cada Taller se desarrollará en 8 horas correspondientes a las sesiones de trabajo en el aula Informática y a las exposiciones presenciales, por lo que este Temario se impartirá en un total de 48 horas.

Taller 1. Visualización, manipulación y edición de datos geográficos. Servicios OGC. WMS

Taller 2. Generación y análisis de Modelos Digitales de Terreno. Aplicaciones en hidrología.

Taller 3. Capacidad de acogida del territorio. Accesibilidad y cambios en los usos del suelo.

Taller 4. Planificación del modelado.

Taller 5. Generación del modelo 3D.

Taller 6. Texturización, iluminación y renderizado del proyecto.

Metodología docente.

Actividad formativa 1.

Con esta actividad se pretende que el alumno adquiera los conceptos básicos sobre los fundamentos de los Sistemas de información geográfica (SIG), los modelos de datos y sus múltiples aplicaciones en ingeniería civil. Para ello el alumno deberá participar en las Sesiones Teóricas 1 y 2, elaborar un mapa conceptual de cada una de ellas, seguir las guías de trabajo autónomo y desarrollar un trabajo en grupo en el Taller 1.

Actividad formativa 2.

Con esta actividad se pretende que el alumno adquiera los conceptos básicos sobre cartografía digital, infraestructuras de datos espaciales y bases de datos territoriales. Simbolización y Cartografía temática en la planificación territorial y urbana. Consultas y herramientas de análisis de la información espacial. Modelos digitales de terreno y cartografías derivadas. Para ello el alumno deberá participar en las Sesiones Teóricas 3 y 4, elaborar un mapa conceptual de cada una de ellas, seguir las guías de trabajo autónomo y desarrollar un trabajo en grupo en el Taller 2.

Actividad formativa 3.

Con esta actividad se pretende que el alumno adquiera las destrezas necesarias para aplicar las herramientas SIG en la resolución de problemas de planificación territorial, infraestructural y urbanística.

Para ello el alumno deberá participar en las Sesiones Teóricas 5 y 6, elaborar un mapa conceptual de cada una de ellas, seguir las guías de trabajo autónomo y desarrollar un trabajo en grupo en el Taller 3.

Actividad formativa 4.

Con esta actividad se pretende que el alumno adquiera los conocimientos básicos sobre la generación de modelos 3D, elección del modelo, planificación del modelado (definición de objetivos y plazos), recopilación de información y paso de la información recopilada a formato digital.

Para ello el alumno deberá participar en la Sesión Teórica 7, seguir los tutoriales, los talleres prácticos y la propuesta de trabajo individual en el Taller 4.

Actividad formativa 5.

Con esta actividad se pretende que el alumno adquiera destrezas en el manejo de Autocad. Aplicaciones de Autocad al diseño de obras públicas. Ordenes de dibujo y edición 2D, métodos de consulta. Autocad 3D: Entorno y técnicas básicas, control de la visualización. Ordenes de dibujo y edición 3D

Para ello el alumno deberá participar en las Sesiones Teóricas 8 y 9, deberá seguir los tutoriales y desarrollar un trabajo individual en el Taller 5.

Actividad formativa 6.

Con esta actividad se pretende que el alumno adquiera destrezas en el modelado de proyectos de ingeniería: Digitalización de planos. Modelado de elementos del proyecto, Generación de texturas sintéticas usando imagen real, texturización de objetos 3D. Inserción del modelo del proyecto en el entorno generado, Generación de texturas de terreno mediante técnicas de ruido fractal, texturización de terrenos digitales, Generación y texturización de elementos de agua. Cámaras, Iluminación y renderizado. Nociones de Diseño gráfico, presentación de proyectos de ingeniería civil y Marketing gráfico.

Para ello el alumno deberá participar en la Sesión Teórica 10, seguir los tutoriales y deberá desarrollar un trabajo individual en el Taller 6.

8.3.3. Un proyecto de Innovación docente

La reciente adjudicación de un proyecto de innovación docente adscrito al Programa de Innovación y Buenas prácticas Docentes para el curso académico 2010-2011, coordinado por la doctora Mabel Rodríguez Rojas parte también de la experiencia anterior, su denominación es “Aplicación de las TIC’s a la enseñanza del urbanismo y la ordenación del territorio en la ingeniería civil”.

Su objetivo general es el de estimular el desarrollo de técnicas y estrategias docentes innovadoras que favorezcan una enseñanza basada en la participación activa del estudiante universitario, mejorar las metodologías docentes e impulsar la creación y consolidación de equipos docentes y el uso de las TIC.

Se pretende también la coordinación con otros programas de docencia para intentar conseguir el aprovechamiento y la rentabilización de recursos, así como avanzar hacia la coordinación de propuestas que mejoren la docencia en centros, titulaciones y departamentos.

8.3.4. Máster Universitario en Urbanismo

El Máster Universitario en Urbanismo por la Universidad de Granada, recientemente aprobado, incluye entre sus asignaturas las denominadas “Nuevas cartografías: La representación de los procesos espacio-temporales” y “Modelización de escenarios futuros” ambas de carácter optativo y de 4,5 ECTS cada una, y que cuentan entre sus competencias específicas la del aprendizaje de la representación cartográfica, icónica, numérico-gráfica... de fenómenos complejos. Además se contemplan varios seminarios de coordinación con otras asignaturas donde se intentarán aplicar estas herramientas en el seno de una enseñanza de postgrado, dirigida a arquitectos, ingenieros civiles y otros graduados relacionados con el urbanismo y la ordenación del territorio, que está caracterizada por su innovación en cuanto a métodos y objetivos.

CAPITULO 9

Discusión y conclusiones.....311

9.1. Sobre los resultados obtenidos y las principales aportaciones.

9.2. Líneas de investigación futuras.

9 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

9.1. Sobre los resultados obtenidos.

Se señalaba en el primer capítulo que el objetivo principal de esta tesis doctoral era el de mostrar, gracias al empleo de técnicas innovadoras en el ámbito ingenieril, y de forma progresiva ejemplos de cartografías multiescalares en un intento de aproximación a la representación de la variable temporal y a las dinámicas espacio-temporales, y dejar constancia de la utilidad práctica que tienen en el ámbito de la planificación territorial y en el de su enseñanza.

Estas imágenes no son fruto únicamente del diseño de una simbología adecuada y del correcto manejo de las variables visuales que se apuntaban en el segundo capítulo, sino que además necesitan para su creación de la mediación de un conocimiento, unas teorías, unos métodos y una experiencia específica de una práctica profesional.

Las metodologías, propias de distintas especialidades o ramas de conocimiento, y presentadas a lo largo de los nueve capítulos de los que consta este documento permiten nuevas lecturas del territorio y parecen ayudar a la comprensión de los actuales procesos territoriales, de sus fuertes dinámicas ambientales y de los fenómenos que se producen en nuestras ciudades.

La utilización de métodos de evaluación y decisión multicriterio y la generación de escenarios temporales acordes a la aptitud del territorio, parecen ser, a la vista de los resultados, instrumentos útiles en los procesos de planificación y toma de decisiones en territorios complejos y dinámicos.

La metodología mostrada en el capítulo cuarto muestra su aplicabilidad para analizar la idoneidad de un lugar para ubicar un vertedero gracias a la obtención de un índice final de idoneidad. No obstante, en análisis del resto de los índices obtenidos facilita también el estu-

dio de los problemas que puedan plantearse a nivel de los diferentes elementos del medio, lo que finalmente se traducirá en una toma de decisiones en relación a la posibilidad de ubicar o no un vertedero.

Las cartografías obtenidas en la aplicación práctica muestran además la capacidad de los SIG para la ubicación óptima de tan singular equipamiento y nos hace intuir la potencialidad de este instrumento que permitirá a los planificadores, tomadores de decisión u otros actores, profundizar en su conocimiento de la realidad territorial, analizar y emprender acciones, para el correcto emplazamiento de futuros vertederos municipales u otras instalaciones o equipamientos en el territorio.

Es reconocido el carácter impredecible de las decisiones que guían los procesos de urbanización, en una economía globalizada y liberada del factor físico de la distancia, en la que cualquier actividad se puede desarrollar casi en cualquier lugar. En este sentido, los análisis cuantitativos de accesibilidad y su impacto sobre los cambios en los usos del suelo, que se presentan en el tercer capítulo y se aplican en el quinto y sexto, parecen tener, a la vista de los resultados, un potencial relevante como instrumento en la planificación.

El análisis de la dinámica poblacional realizado en el litoral granadino muestra que la trayectoria experimentada por la población en la red de asentamientos manifiesta, en definitiva, dos tendencias divergentes en la evolución del poblamiento: de un lado la marcada vitalidad del litoral y su área de influencia, ligada a su mayor dinamismo social y económico; de otro lado, se evidencia el declive rural de las áreas de interior. El modelo ensayado en este ámbito, que a nivel territorial se vislumbra como posible, necesita de un proceso de validación para ajustarse de forma más apropiada a las expectativas municipales. El análisis de sensibilidad y los

mismos resultados parciales de cada factor se convierten ahora en potenciales escenarios a ser analizados.

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica, y sus funciones de análisis espacio-temporal a través de series cronológicas de usos del suelo, así como su puesta en relación con un conjunto de variables explicativas mediante evaluación multicriterio, permite, en un ejercicio de modelización prospectiva, establecer los posibles escenarios de ocupación reflejados en el capítulo quinto.

Como es palpable en esta experiencia, la combinación de la información territorial georreferenciada junto con la posibilidad de aplicar algoritmos de accesibilidad a la red de transporte, integrados en un único modelo, logra aunar los principios de la modelización basada en actividades con la de la localización de usos y la movilidad, de forma consistente.

Sin embargo la principal novedad de esta aplicación está en la retroalimentación mutua entre análisis estadísticos demográficos y su traducción espacial, y el establecimiento de la superficie potencial de crecimiento urbano en distintos horizontes temporales usando métodos de evaluación y decisión multicriterio.

En este sentido, es necesario determinar la vigencia de los resultados del análisis, pues seguramente en un plazo que debe preverse, se tendrían que incorporar nuevos aspectos relevantes a tener en cuenta, debido a las condiciones cambiantes del macro y microentorno de la situación en cuestión (cambios en los entornos biofísico, social, económico, político y tecnológico).

La modelización desarrollada en este trabajo, la información generada y su sugerente representación gráfica, permiten una aproximación consistente a la incertidumbre intrínseca de los horizontes futuros a establecer y necesarios para la implementación de modelos de planificación integrada y ayuda a los planificadores, tomadores de decisión u otros actores. Contribuye, en gran medida, a profundizar en su conocimiento de la realidad del territorio, a analizar y emprender acciones, teniendo en cuenta las necesidades e intereses de la comunidad y la visión que tienen de su propio futuro en lo concerniente a los usos del suelo, incluidas las amenazas y oportunidades a las que conllevaría cada posible solución.

En cuanto a la aplicación presentada en el capítulo sexto, y lejos de intentar cuestionar la validez o no de los modelos de simulación espacio-temporal, de su sensibilidad o robustez, o del controvertido asunto de la elección de unos u otros índices espaciales para su evaluación, de su aplicabilidad o de su sensibilidad a la escala, de la que existe bibliografía especializada muy reciente (Aguilera, 2010), fuera también de las discusiones sobre la subjetividad o arbitrariedad en algunas de las etapas de la modelización, se limita este apartado a resaltar las aportaciones más relevantes, a la vista de los resultados obtenidos, sobre la metodología utilizada.

La integración de las variables de accesibilidad territorial como factores para la simulación del crecimiento urbano permite incorporar aspectos como las distancias no euclidianas de acceso a los nudos de la red de alta capacidad y de acceso a los servicios e infraestructuras propios de un núcleo urbano consolidado, lo que, a nuestro juicio, constituye una de las mayores aportaciones del presente trabajo. El gradiente de accesibilidad territorial añade la dimensión temporal relativa a la ejecución de las infraestructuras viarias tan decisiva en el fenómeno de expansión urbanística. La simulación para 2006 y el escenario propuesto para 2020, con la incorporación de los nuevos tramos de autovía previstos, se nutren de estos mapas sintéticos, y se muestra como una herramienta útil para la proyección en el tiempo de fenómenos de crecimiento urbano.

El empleo de indicadores de análisis espacial, para comparar escenarios reales y simulados (Berling-Wolff et al. 2004), junto a métricas basadas en la localización exacta de los nuevos crecimientos y mediante buffers sucesivos (Pascual et al. 2010), parece una agrupación interesante para la validación de los resultados obtenidos y comprobar el ajuste, tanto en su estructura formal como en su localización, de estos con la realidad.

Su utilización para valorar el resultado de la modelización con horizonte del 2020 hace posible el reconocimiento y monitorización de los cambios estructurales que se podrían inducir en los paisajes y servir de argumento para los diferentes agentes en los procesos de planificación territorial e infraestructural. Es necesario sin embargo hacer notar las dificultades e inconvenientes que la cartografía de base y su tratamiento han aportado a este trabajo, siendo necesarias labores de

homogeneización y filtrado (mediante un autómata celular sencillo) previas a la conversión de formatos, que pueden desvirtuar de alguna forma la precisión de los valores de los índices. El uso de imágenes satelitales de una resolución semejante, como alternativa a las cartografías utilizadas, y un tratamiento también raster de las métricas podrían haber resuelto algunas de estas dificultades. En cualquier caso, éste no pretende ser el aspecto de mayor interés del estudio.

La identificación y representación espacial de las alteraciones en la fragilidad eco-paisajística y su tratamiento metodológico mediante la integración de los gradientes de exposición visual y las métricas de la evolución de la superficie urbana y su cercanía a zonas sensibles, si que pueden ser de gran utilidad para la ordenación territorial y gestión del paisaje, permitiendo establecer relaciones entre esta alteración y las características del ámbito estudiado y simular una posible fragilidad futura. Sería interesante, por tanto, en las primeras etapas de la planificación (en los proyectos básicos de trazado y en los análisis de alternativas) un tratamiento más cuidadoso de las unidades de paisaje, de su fragilidad visual y de los ecosistemas afectados.

La modelización desarrollada en el sexto capítulo permite una aproximación a los horizontes futuros a establecer y a las medidas de protección del paisaje necesarias para la implementación de modelos de planificación integrada. Las cartografías generadas al efecto permiten la mejor comprensión de los fenómenos estudiados, de las variables explicativas y de los posibles escenarios de ocupación urbana.

La experiencia de trasladar estas metodologías para la representación de los procesos y flujos que preocupan a los ingenieros, arquitectos, ambientólogos y geógrafos, a los alumnos de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Granada ha sido sin duda la tarea más gratificante y la que mejores resultados ha generado.

La primera experiencia fue gratamente satisfactoria. La incertidumbre ante un cambio tan sustancial, en el que los alumnos deben enfrentarse al manejo de un complejo software, se transformó en satisfacción por la calidad de los trabajos y paneles resumen, que hicieron posible la presentación de los mejores proyectos al Concurso de la Asociación de Ingenieros y la posterior exposición

de los trabajos premiados. Los resultados fueron inmejorables, el esfuerzo de profesores y alumnos en una tarea tan ilusionante como complicada dio sus frutos, y las encuestas finales corroboraron las impresiones generales.

Entre las dificultades encontradas en el camino se pueden destacar las relacionadas con el elevado número de alumnos y la necesidad de equipos informáticos y aulas apropiadas, que se solucionó en parte con el uso de un portátil por grupo, y las derivadas del aprendizaje previo de un nuevo software en el reducido espacio temporal de un cuatrimestre. Este último aspecto y el especial interés que despierta en el alumnado esta herramienta pueden propiciar una mayor preocupación, descompensada en ocasiones, por el manejo del software que por la aplicación práctica de los conocimientos teóricos adquiridos.

Sin embargo, a pesar de las normales dificultades, a lo largo de los seis cursos posteriores se percibe la mejor comprensión de los contenidos teóricos y la mejora sustancial en la calidad de los trabajos prácticos así como un notable entusiasmo y participación del alumnado.

A lo largo de estos años de desarrollo de la Tesis, y de sólida formación docente e investigadora, ha sido una constante la aplicación práctica de los resultados obtenidos para la planificación urbanística y territorial, así como para su enseñanza multidisciplinar (caminos, arquitectura, ambientales y geografía), aproximando a la formación del alumnado desarrollos científico - técnicos a menudo demasiado distantes de la docencia.

9.2. Principales aportaciones y líneas de investigación futuras.

Paralelamente al proceso de redacción de esta tesis se han publicado varios artículos y capítulos de libros, así como una decena de aportaciones a congresos nacionales e internacionales, jornadas sobre docencia y seminarios de investigación. Se citan a continuación los más representativos.

En revistas Internacionales de alto índice de impacto:

Molero, E., Grindlay, A. L. y Asensio, J.J. (2007). Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. *GeoFocus (Artículos)* nº7, p. 120-147.

Zamorano, M., Molero, E., Hurtado, A., Grindlay, A. y Ramos, A. (2008): Evaluation of a municipal landfill site in Southern Spain with GIS-aided methodology”, *Journal of Hazardous Materials*. 160(2-3): 473-81.

Zamorano, M., Molero, E., Grindlay, A., Rodríguez, M. L., Ramos, A. & Calvo, F. J. (2009): A planning scenario for the application of Geographical Information Systems in municipal waste collection. A case of Churriana de la Vega (Granada, Spain). *Resources, Conservation & Recycling*, 54 (2): 123-133

Grindlay, A.L., Zamorano, M., Rodríguez, M.I., Molero, E., Urrea, M.A. (2011): Implementation of the European Water Framework Directive: Integration of hydrological and regional planning at the Segura River Basin, southeast Spain. *Land Use Policy* 28: 242-256

Zamorano, M., Grindlay, A.L., Molero, E., Rodríguez, M.I. Title: Diagnosis and proposals of waste management in industrial areas related to service sector: case study in the metropolitan area of Granada (Spain) *Journal of Cleaner Production*. Under revision Ms. Ref. No.: JCLEPRO-D-10-00569R1

En Congresos Internacionales:

Zamorano M., Grindlay A., Hurtado A., Molero E., y Ramos A. (2006): A methodology for the optimal siting of municipal waste landfill aided by Geographical Information

Systems. *WIT Transactions on Ecology and the Environment Waste Management and the Environment* III, 92: 347- 358

Grindlay, A.L, Molero, E. y Rodríguez, M.I, (2007): Desarrollo Infraestructural Hidráulico, Planificación Hídrica y Territorial en la cuenca del Segura: hacia una Planificación Integrada. V Congreso Internacional de Ordenación del territorio (CIOT), Málaga, noviembre de 2007

Grindlay, A.L, Rodríguez, M.I y Molero, E., (2008): Infraestructuras de abastecimiento y suburbanización en la cuenca del Segura: la transformación de las huertas tradicionales. II Congreso Internacional Paisaje e Infraestructuras. Asociación Española de la Carretera. Granada, noviembre de 2008. pp. 1-29

Rodríguez, M.I., Grindlay, A.L., Molero, F.E. (2008): Gestión integrada del agua y del territorio. VI Congreso Ibérico de Gestión y planificación del agua. Fundación Nueva Cultura del Agua. Vitoria, diciembre de 2008 pp.1-9. ISBN 978-84-88949-96-7

Grindlay, A.L, Rodríguez, M.I., Molero, E. y Urrea, M. (2008): Transformación espacial y relación entre planificación urbanístico-territorial e hídrica en la cuenca del Segura: los actuales retos de su nueva planificación hidrológica. VI Congreso Ibérico de Gestión y planificación del agua. Fundación Nueva Cultura del Agua. Vitoria, diciembre de 2008 pp.1-11 ISBN 978-84-88949-96-7

Grindlay, A., Zamorano, M., Rodríguez, M.I., Molero, E., Urrea, M.A. (2009): Territorial Transformation and Water Utilization: Hydrological Planning Scenarios in the Segura River Basin. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. Sustainable Development and Planning IV, 120: 975-984.

Molero, E. y García, P. (2010): Gradientes de accesibilidad y transformación territorial: Una aportación a los estudios de fragilidad paisajística. VI CIOT Congreso Internacional de Ordenación del Territorio, Octubre 2010, Pamplona. pp. 1382-97.

En Congresos Nacionales:

Grindlay, A.L., Hernández, E., Cortés, R. y Molero, E. (2004): Interacción accesibilidad-usos del suelo: Perspectivas de desarrollo litoral granadino ante el trazado de la Autovía del Mediterráneo. VI Congreso de Ingeniería del Transporte. Vol 4. Zaragoza.

Pérez, R., Molero, E., Valenzuela, L.M. y Matarán, A. (2004): "Aplicación de los sistemas de información geográfica para la elaboración de modelos predictivos del cambio en los usos del suelo", El empleo de los SIG y la Teledetección en Planificación Territorial. Murcia. XI Congreso Nacional de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.

Molero, E., Grindlay, A. L. y Rodríguez, M. I. (2007): Taller de planificación: Análisis territorial mediante Sistemas de Información Geográfica. Congreso sobre Innovación Docente. Universidad de Huelva

En Capítulos de Libros:

Valenzuela, L.M., Molero, E. y Aguilera, F. (2006): Los Sistemas de Información Geográfica. En Martínez Montes y Pellicer Almiñana (Dir.): Organización y Gestión de Proyectos y Obras. Mc Graw Hill.

Valenzuela, L.M., Aguilera, F., Soria, J. A. y Molero, E. (2008): Creation and evaluation of development scenarios for metropolitan patterns. En: Paegelow y Camacho (Eds.): Modelling Environmental Dynamics. Advances in Geomatic Solutions. Springer.

Camacho, M.T., Molero, E. y Paegelow M. (2010): Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.): Tecnologías de la Información Geográfica: La información geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. pp. 658-678.

En Jornadas sobre docencia:

Cordero, L.; Rodríguez, M.I.; Grindlay, A.L. y Molero, E. (2010): Aplicación de las TICs a la Enseñanza del Urbanismo y la Ordenación del Territorio en la Ingeniería Civil. INDOTEC 2010. I Jornadas sobre innovación docente y

adaptación al EEES en las titulaciones técnicas. Granada. 9 y 10 de Septiembre de 2010.

Como nuevas líneas de investigación a seguir en los próximos años creo muy interesante la continuación y maduración de la metodología seguida en los capítulos quinto y sexto, con la aplicación de los gradientes de accesibilidad como variable explicativa de los procesos espacio temporales de crecimiento urbano.

En el apartado docente, la reciente adjudicación de un proyecto de innovación que parte de la experiencia relatada en el capítulo séptimo, denominado "Aplicación de las TIC's a la enseñanza del urbanismo y la ordenación del territorio en la ingeniería civil" plantea nuevas e ilusionantes posibilidades en el acercamiento de estos métodos al alumnado.

Además el Máster Universitario en Urbanismo por la Universidad de Granada, recientemente aprobado, incluye entre sus asignaturas las denominadas "Nuevas cartografías: La representación de los procesos espacio-temporales" y "Modelización de escenarios futuros" que cuentan entre sus competencias específicas la del aprendizaje de la representación cartográfica, icónica, numérico-gráfica... de fenómenos complejos. Además se contemplan varios seminarios de coordinación con otras asignaturas donde se intentarán aplicar estas herramientas en el seno de una enseñanza de postgrado, dirigida a arquitectos, ingenieros civiles y otros graduados relacionados con el urbanismo y la ordenación del territorio.

English text.....319

4.3. Evaluation of a municipal landfill site in souther Spain with GIS - aided methodology

CHAPTER 9

Discussion and Conclusions

9.1. Result obtained regarding to the objectives of the thesis

9.2. Future reseach

ENGLISH TEXT.

4.3. Evaluation of a municipal landfill site in Southern Spain with GIS-aided methodology

4.3.1. Abstract

Landfill siting should take into account a wide range of territorial and legal factors in order to reduce negative impacts on the environment. This chapter describes a landfill siting method, which is based on EVIAVE, a landfill diagnosis method developed at the University of Granada. Geographical Information Systems (GIS) technology is also used to generate spatial data for site assessment. Landfill site suitability is assessed on a scale based on territorial indices that measure the risk of contamination for the following five environmental components: surface water, groundwater, atmosphere, soil, and human health. The method described in this chapter has been used to evaluate an area in Granada (Spain) where there is a currently operating landfill. The results obtained show that suitable locations for the disposal of municipal waste were successfully identified. The low environmental index values reflect the suitability of this landfill site as well as its minimal negative impacts on the environment.

4.3.2. Introduction

Landfill siting is a complex process involving social, environmental and technical parameters as well as government regulations. As such, it evidently requires the processing of a massive amount of spatial data. Various landfill siting techniques have been developed for this purpose. Some of them use Geographic Information Systems (GIS) to find suitable locations for such installations [1–3]. For example, Lin and Kado [4] developed a mixed-integer spatial optimization model based on vector-based data to help decision makers find a suitable site within a certain geographic area. Other researchers propose the use of multiple criteria analysis by itself [5,6], or with GIS [7]. The use of artificial intelligence technology, such as expert systems, can also be very helpful in solid waste planning and management.

Fuzzy inference systems have also been proposed [8,9]. EVIAVE is an environmental diagnosis method developed by researchers at the University of Granada. It provides information concerning potential environmental problems caused by currently operating landfills. It is basically a tool for assessing the suitability of landfill sites and for monitoring their operation. Its main objective is to develop a decision support system for integrated municipal waste management, more specifically for decisions related to renovating or closing landfill sites. EVIAVE has been validated with data from more than fifty landfills in Spain [10], Venezuela [11] and Chile [12].

4.3.3. Landfill siting using a GIS

Over the last three decades, advances in computer science have led to the creation of GIS, initially based on McHarg's [13] basic map layering concept. GIS combines spatial data (maps, aerial photographs, and satellite images) with quantitative, qualitative, and descriptive information databases, which can support a wide range of spatial queries. All of these factors have made GIS an indispensable tool for location studies [14], particularly for landfill siting.

Processing such data with conventional drawing and calculation tools is generally time-consuming. GIS, however, converts georeferenced data into computerized maps, while GIS map analysis tools also make it possible to efficiently manipulate maps with a computer. The advantages of using GIS for waste disposal and landfill site selection have been demonstrated by various researchers. Jensen and Christensen [15] demonstrate the use of GIS in the selection of solid and hazardous waste disposal sites. GIS was subsequently used by Fatta et al. [16] for the site selection of an industrial waste facility. Siddiqui [1] presents a method that identifies and ranks potential landfill areas for preliminary site assessment. This method combines GIS with a decision-making method based on the analytic hierarchy process (AHP). GIS technology has also been combined with AHP and fuzzy set theory [9]. Lin and Kado [4] developed a mixed-integer programming model to obtain a site with optimal compactness. The compactness model was further extended to include multiple siting factors with weights that were determined by the GIS map layer analysis function. According to Michaels [17] a GIS can be used to combine

various demographic, geological, land use and census tract maps to apply landfill criteria, and find suitable areas to place a landfill. Kao et al. [18] developed a prototype network GIS to increase the efficiency of complex solidwaste landfill siting. Furthermore, this system makes site-related information available to the general public; assists local environmental protection agencies in maintaining a GIS; and helps the central environmental protection agency to manage, instruct, and evaluate the local siting process. Kontos et al. [7] describe a spatial method that integrates multiple criteria analysis, GIS, spatial analysis, and spatial statistics with a view to evaluating a region for landfill siting.

This chapter describes an EVIAVE-based method developed at the University of Granada for the assessment of landfill sites in accordance with European Union legislation. This method is innovative because it establishes general indices to quantify overall environmental impact as well as individual indices for specific environmental components (i.e. surfacewater, groundwater, atmosphere, soil, and human health). Quantification variables and impact indicators represent indices more precisely as well as make the results more objective.

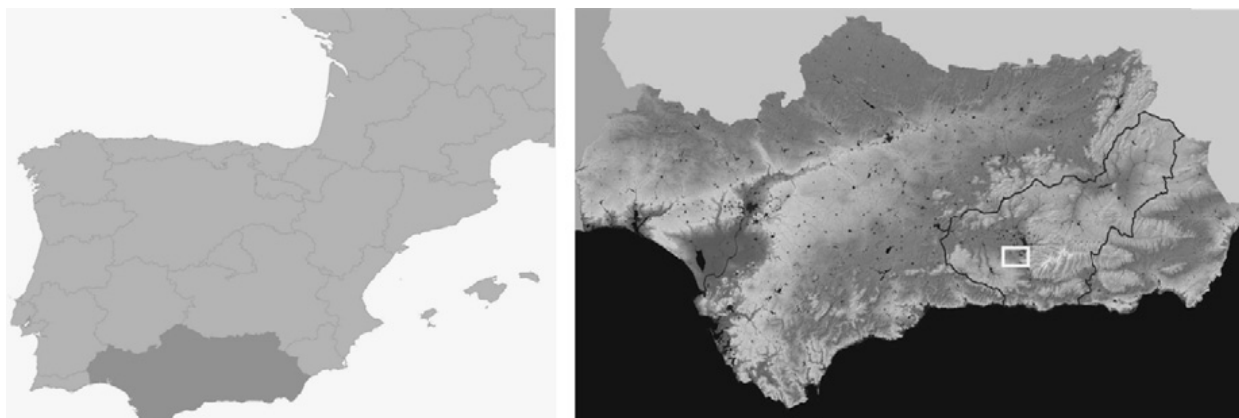
Since this method requires processing large quantities of spatial data, we used GIS and its spatial analysis tools to create the digital geodatabase. Commercial GIS software packages include analytical tools that perform spatial analysis processes. To automate the processes of establishing composite evaluation criteria, performing multiple criteria analysis, and carrying out spatial clus-

tering, algorithms were developed in a Microsoft Visual Basic programming environment compatible with ESRI ArcGIS, a GIS software. Although POPSIS [19] and Compromise Programming [20] are multiple criteria analysis methods that have been proposed for the evaluation of the final suitability index, we decided to use simple additive weighting (SAW) to solve the multiple criteria problem. The GIS-aided landfill siting method presented in this article combines GIS spatial analysis tools with MCA to evaluate an entire region. We describe how this method was applied to a region in Granada (Spain) to assess the suitability of a currently operating landfill site. The hydrogeological, environmental, social, and technical/economic evaluation criteria are the same as those used in EVIAVE.

4.3.4. Area of study

The area studied measures 300 km², and is located to the south of the metropolitan area of Granada on the western edge of the Sierra Nevada mountain range (Fig. 1). After Seville and Malaga, Granada has the third largest population in Andalusia, and two thirds of its inhabitants live in the metropolitan area of the city. 55% of the population of the province of Granada (817,000) is concentrated in a surface area of 830km², i.e. less than 7% of the total area. The population density in the metropolitan area is thus 530 inhabitants per km² as compared to 32 inhabitants per km² in the rest of the province. In this area there is a landfill of medium density and high density. This landfill is used to dispose and elimina-

4.3.1. • Figura 1. Map of situation and localization of existing landfill site.



te waste from a solid waste treatment plant located in the town of Alhend'in at Loma de Manzanares. This plant handles the waste from 26 municipal districts, whose 677,505 inhabitants generate 300,000 t of waste per year.

4.3.5. Methodology

4.3.5.1. Definition

The presence of a landfill in this area evidently has an important effect on the environment. Its impact is largely dependent on the affected elements at the site as well as on the spatial distribution of the effects. The first step in the evaluation of the environmental impact of the landfill is the identification of any elements, which may be sensitive to this impact. In different Environmental Impact Assessment (EIA) processes [21], these elements are known as environmental components. The components in our study are ground water, surface water, soil, atmosphere, and human health [22–25] because of their interactions with the dynamics of the release point. This means that the landfill is regarded as an active installation that can produce emissions.

Our evaluation method is based on the use of environmental indices to provide a quantitative assessment of the possible environmental interactions between a landfill and potentially affected environmental components because of the siting of the landfill. Similarly to EVIAVE, this method evaluates municipal solid waste landfills classified as non-hazardous waste landfills by Directive 31/99 [26]. It is thus applicable in the European Union, and in any other country where similar legislation exists, or indeed, where there is no legislation or where the legislation is less prescriptive than this Directive.

Fig. 2 shows the hierarchical structure of the decision problem, which has four levels. The first level represents the criteria and subcriteria used. It takes into account spatial attributes for landfill siting, and the quantification of landfill variables and environmental impact indicators used to calculate different environmental indices. The second level represents the Probability of Contamination Indicator for each environmental component (Pbci) and the Environmental Value for each component (eVi). The third level represents the Environmental Risk Index for each component (ERli) whereas the fourth

and last level represents the ultimate goal of the decision hierarchy or Land Suitability for Landfill Siting Index (LSI).

4.3.5.1.1. Level 1: landfill variables and impact indicators.

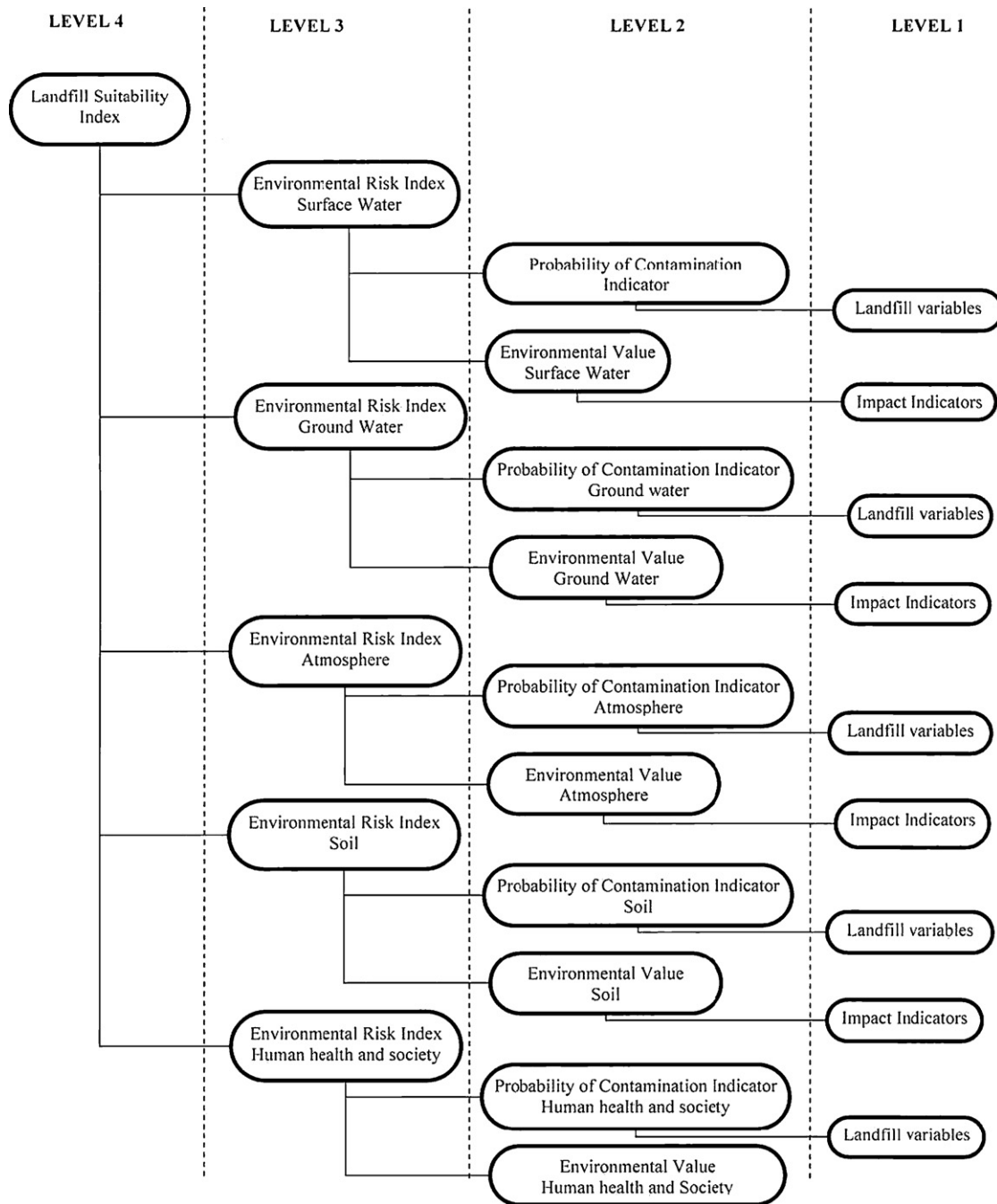
a. Definition of landfill variables. Any waste-facility siting framework must be capable of identifying important factors and interactions that contribute to the siting outcome. A theoretical framework is needed to structure these elements and cause-effect relationships [27]. In order to better assess contamination probability, the framework elements are known as variables, which represent each environmental component at the landfill. They are *related to the biochemical and physical processes* that directly or indirectly affect the environmental components. Such elements are associated either with the siting outcome or an essential component of the siting process.

The siting framework or variables were selected by taking into account previous research and reviews of relevant research. Also taken into account were European and Spanish legislation regarding the following:

- distances from the boundary of the site to residential and recreation areas, waterways, water bodies, and other agricultural or urban sites;
- existence of groundwater, coastal water or nature protection zones in the area;
- geological and hydrogeological conditions in the area, more specifically, the existence of a geological barrier consisting of a mineral layer which satisfies permeability and thickness requirements established in Directive 31/99;
- risk of flooding, subsidence, landslides or avalanches on the site;
- protection of the nature or cultural patrimony in the area;
- climate conditions.

Table 1 shows a summary of the variables for each environmental component as well as various causal connections identified in other research studies.

Based on EVIAVE, the evaluation for each variable (j) can be obtained by the Contamination Risk Index, as expressed in Eq. (1). In this expression, Cj is the Classification of the variable and provides information concerning the



4.3.2. • Figura 2. Hierarchical structure of the methodology.

interaction of disposal processes and environmental characteristics related to the variable, whereas W_j is the weighting of each variable [10,44]. The range of values of the index may be 1, 2, 3, 4 or 5.

$$CRI_j = C_j \times W_j \quad (1)$$

EVIAVE defines the weighting of each variable, which can have values of 1 or 2, depending on the relationship between the variable and the concept of structural elements at the release point. The structural elements considered were organic matter, humidity, and waste density. These three concepts participate in the principal biochemical and physical processes that take place at the release

Variables	Environmental components affected	References
Aquifer characteristics	Ground water	[28–30]
Distance from infrastructure	Human health and society	[7,31,32]
Distance from surface water mass	Surface water	[7,33–35]
Distance from population centers	Human health and society	[7,36,37]
Erosion	Soil	[1,38]
Fault	Ground water	[1,38]
Slope to surface water	Surface water	[1,38]
Pluviometry	Ground water, surface water, atmosphere, soil, and human health and society	[39–42]
Release-point localization in flood-water storage volume	Ground water, surface water, and soil	[1,38]
Release-point localization in surface runoff	Ground water and surface water	[1,38]
Visibility	Human health and society	[7,43]
Seismic risk	Ground water, surface water, atmosphere, soil, and human health and society	[38]
Wind	Atmosphere and human health and society	[7,22,38]

Table 4.1 • Waste-facility siting framework

point. They cause gas and leachate emissions, which affect all variables, and provide greater weighting of the different landfill variables [10,44]. W_j reaches a value of 2 when the variable is directly related to the structural elements, or when it affects environmental components. In this case the weighting of each variable turned out to be the same.

As an example, in the following sections we provide an explanation of the classification and weighting of the variable Aquifer characteristics. The same justification and quantification was applied to all the other variables and environmental components. This variable identifies the characteristics of aquifers located near possible landfill sites and quantifies their vulnerability by taking into account leachate emissions from the waste mass. Since it is a variable that directly affects groundwater environmental components, it has a weighting of 2.

The variables have been classified on the basis of the vulnerability index of the aquifer to pollution. Since many countries have experienced problems of ground water contamination, this has led to the development of methods to discover exactly how pollutants reach aquifers. Examples of aquifer vulnerability assessment methods are DRASTIC, SINTACS, GOD and EPIK. The first three are for the evaluation of free detritic aquifers, whereas the fourth targets karstic aquifers. They are all rather similar, and only differ in the number of variables. The choice of method depends on factors such as [45]: (i) knowledge of the methodology; (ii) available information; (iii) scope of the evaluation; (iv) validation of results. Of course, some of these methods are more widely used than others, and in many cases the choice of method depends on the country involved. For example,

the USA and Canada prefer DRASTIC, while South America tends to use both GOD and DRASTIC. GOD is more prevalent in Spain and England, whereas the rest of Europe tends to use SINTACS. EPIK is generally preferred in regions along the Mediterranean coast, and is mostly used for the evaluation of karstic aquifers [45]. Table 2 shows the classification of this variable, based on all of these methods.

Table 4.2 • Classification of the variable Aquifer characteristics

Classification (C_j)	Condition		References
	Method	Vulnerability Index (VI)	
Very low	1	GOD	$lv < 0.1$
		DRASTIC	$lv < 28$
		SINTACS	$lv \leq 80$
		EPIK	$lv = 2$ or 3
Low	2	GOD	$0.1 \leq lv < 0.3$
		DRASTIC	$29 \leq lv \leq 85$
		SINTACS	$81 \leq lv \leq 105$
		EPIK	$lv = 4$ or 5
Average	3	GOD	$0.3 \leq lv < 0.5$
		DRASTIC	$86 \leq lv \leq 142$
		SINTACS	$106 \leq lv \leq 140$
		EPIK	$lv = 6$ or 7
High	4	GOD	$0.5 \leq lv < 0.7$
		DRASTIC	$143 \leq lv \leq 196$
		SINTACS	$141 \leq lv \leq 186$
		EPIK	$lv = 8$ or 9
Very high	5	GOD	$lv \geq 0.7$
		DRASTIC	$lv < 196$
		SINTACS	$lv \geq 187$
		EPIK	$lv = 10$

b. Definition of impact indicators. The description of environmental characteristics allows us to quantify the environmental components necessary to specify environmental indices. Impact indicators were defined in the Environmental Impact Assessment process to measure the impact of the landfill on each component. These are environmental characteristics that could be affected by projects [21]. They depend on the project type as well

Table 4.3 • Classification of the variable Aquifer characteristics

Environmental components	Impact indicators	References
Surface water	A ₁ : Type of surface water mass	[50–54]
	A ₂ : Water use	
	A ₃ : Water quality	
Ground water	B ₁ : Water use	[50,51,55,56]
	B ₂ : Water quality	
Atmosphere	C ₁ : Air quality	[22,57]
Soil	D ₁ : Soil use	[58,59]
	D ₂ : Vegetation type	
	D ₃ : Vegetal covering	

as on the specific characteristics of the affected area. Examples of such indicators are air quality, biological populations, communities and habitats, water quality, biota, etc. [21,48,49].

For our purposes, impact indicators were defined to quantify Environmental Value Indices for each environmental component. These indicators were selected because of their relevance for impact assessment in the eyes of professionals, stakeholders, and the general public. Table 3 shows impact indicators for each environmental component in the case of municipal landfills, environmental calculation, and certain causal connections identified in relevant research. One or more impact indicators were defined for each environmental component except in the case of human health, which has a maximum environmental value index. Each impact indicator may obtain values of 1, 2, 3, 4 or 5. For example, Table 4 shows the justification and quantification in the case of the impact indicator use of water for the surface water environmental component. The same justification and quantification was applied to the other characteristics and environmental elements.

4.3.5.1.2. Level 2: Probability of Contamination Indicator and Environmental Values

a. Definition of Probability of Contamination Indicator.

According to EVIAVE, the definition of the Probability of Contamination for each environmental component must consider the scale of operation, waste characteristics and the spread of waste disposals in the landfill environment [10,44] because suitable siting, design and operation of the landfill are essential to eliminate or mini-

mize potentially adverse environmental impacts [21,25]. It was thus possible to analyze two indices: Probability of Contamination due to landfill operation, and Probability of Contamination because of landfill siting.

In this case we have only considered the Probability of Contamination Indicators for each environmental component. These indicators are the same as those defined by EVIAVE, but only the variables related to landfill siting were taken into account. Probability of contamination is expressed by Eq. (2) where n is the number of variables affecting each environmental element; CRI_j is the Contamination Risk Index for each variable (j); CRI_{jminimum} is the minimum value obtained by the CRI for each variable; and CRI_{jmaximum} is the maximum value obtained by the CRI for each variable. It may have values between 0 and 1 (see Table 5).

$$Pbc_i = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} CRI_j - \sum_{j=1}^{j=n} CRI_{j\text{minimum}}}{\sum_{j=1}^{j=n} CRI_{j\text{maximum}} - \sum_{j=1}^{j=n} CRI_{j\text{minimum}}} \quad (2)$$

Table 4.4 • Justification and quantification of the impact indicator Water use for the environmental component ground water

A ₂	Water use	5	Human drinking water, aquaculture and recreational uses, including beaches suitable for bathing
		4	Agriculture
		3	Industrial
		2	Other human uses not previously considered
		1	Not for human use

4.3.5.1.3. Environmental Value.

The concept Environmental Value identifies and quantifies the environmental assessment of each environmental component in the area of the landfill. It is regarded as a relative environmental value since it takes into account the relationship between the landfill’s environmental characteristics and/or social and political characteristics, the possible emissions at the release point [10,44], as well as the environmental importance of each element in the immediate surroundings of the landfill.

Environmental Values for surface water, ground water, atmosphere, and soil are expressed by Eqs. (3)–(6), respectively. As previously mentioned, human health always has a maximum value. In these expressions A_i, B_i, C_i and D_i are classifications of the impact indicators shown in Table 3.

$$eV_{\text{surfacewater}} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} \quad (3)$$

$$eV_{\text{groundwater}} = \frac{B_1 + B_2}{2} \quad (4)$$

$$eV_{\text{atmosphere}} = C_1 \quad (5)$$

$$eV_{\text{soil}} = \frac{D_1 + D_2 + D_3}{3} \quad (6)$$

Values range from 1 to 5 for each environmental element as shown in Table 5. If an environmental element obtains high or very high values, this means that the landfill is located in an area of greater environmental sensitivity for the element in question

4.3.5.1.4. Level 3: Environmental Risk Index

The Environmental Risk Index definition is similar to the EVIAVE index of the same name. It determines the environmental impact potential for each environmental component, and reflects whether or not any interaction exists between the release point or landfill and the characteristics of the environment. For each landfill, the ERI indicates which environmental element or elements would be or are most affected by the presence of wastes. This makes it possible to determine the extent of possible deterioration at each landfill site. This index is expressed by Eq. (7), where P_{bii} is the Probability Indicator, and where eV_i is the Environmental Value for each environmental component (i). The index has values between 0 and 5. Table 7 shows values for the index and its classification, based on the P_{bci} and eV_i values.

$$ERI_i = P_{bci} \times eV_i \quad (7)$$

4.3.5.1.5. Level 4: Landfill Suitability Index

The global suitability of landfill sites is quantified by a general index called the Landfill Suitability Index (LSI). In EVIAVE the Environmental Landfill Impact Index (ELI) characterizes the overall environmental stage of operating landfills. In this case the index characterizes the overall environmental suitability of the possible landfill sites. The grading scale used for the Landfill Site Suitability Index is 0–25, ranging from the least suitable to the most suitable area. This index is represented by Eq. (8) where ERI_i is the Environmental Risk Index for each environmental component (i). Table 8 shows the classification of the index.

$$LSI = \sum_{i=1}^{i=5} ERI_i \quad (8)$$

Unlike other methodologies [1–3], these indices do not initially exclude areas from further examination. Therefore, the legally unsuitable areas will have a low initial suitability index, which in all likelihood will ultimately exclude them from further examination during the final steps of the siting process.

4.3.5.2. Modeling the landfill variables.

There are two basic approaches to the question of how to model space in GIS. Depending on whether the focus is on properties or localization, two different data models may be generated: the vector model or the raster model.

The choice of one model or the other depends on what the GIS is going to be used for [59,60]. We chose the raster model for our research because of its speed and efficiency at superpositioning maps. The vector model was used only to generate the basic cartography, and initially model variables.

An optimal resolution of 10m was adopted for base cartography at a scale of 1: 10,000. The following techniques and operations were applied: local analysis (reclassification and map superposition), immediate vicinity analysis (filtrates and slope calculation), and extended vicinity analysis (Euclidean distances and proximity or 'buffer' analysis).

4.3.5.3. Model implementation.

Cartographic modeling is a more general term than the set of steps described above. The method involves the arrangement of a series of data layers in logical sequence, including topological and thematic operations, information external to GIS, and value judgments in order to find solutions to specific spatial problems. Tomlin describes cartographic modeling as a general methodology for the analysis and synthesis of geographical data, and defines it as the use of the basic GIS operations in a logical sequence to resolve complex spatial problems. The phases of our model correspond to the levels defined in the hierarchical structure of the decision problem:

1. Cartographs of the Contamination Risk Index (CRI_j). Each localization variable is modeled and reclassified, and subsequently, each W_j is measured using map calcu-

Indicators	Classification				
Pbc_i	Improbable $0 \leq Pbc_i < 0.2$	Not very probable $0.2 \leq Pbc_i < 0.4$	Seldom probable $0.4 \leq Pbc_i < 0.6$	Probable $0.6 \leq Pbc_i < 0.8$	Very probable $0.8 \leq Pbc_i \leq 1$
eV_i	Very low $1 \leq eV_i < 1.8$	Low $1.8 \leq eV_i < 2.6$	Average $2.6 \leq eV_i < 3.4$	High $3.4 \leq eV_i < 4.2$	Very high $4.2 \leq eV_i \leq 5$
ER_i	Very low $0 \leq ER_i < 1$	Low $1 \leq ER_i < 2$	Average $2 \leq ER_i < 3$	High $3 \leq ER_i < 4$	Very high $4 \leq ER_i \leq 5$
LSI	Unsuitability $20 \leq LSI \leq 25$	Low suitability $15 \leq LSI < 20$	Average suitability $10 \leq LSI < 15$	High suitability $5 \leq LSI < 10$	Very high suitability $0 \leq LSI < 5$

Table 4.5 • Classification of environmental indicators.

lator algorithms and the product operator. Each landfill localization variable generates a cartograph for each impact on the environmental components. The value for the Contamination Risk Index is indicated on each pixel.

2. Cartographs of the Impact Indicators (A_i , B_i , C_i , D_i). Each Impact Indicator is modeled to generate a cartograph for each one.

3. Cartographs of the Probability of Contamination Indicators (Pbc_i). Results are grouped by using arithmetic superposition to obtain cartographs of the Probability of Contamination Indicators, with one image for each environmental component.

4. Cartographs of Environmental Values (eV_i). The values obtained to quantify the Impact Indicators are used to calculate the Environmental Value (eV) for each environmental component by means of arithmetic superposition of the Impact Indicators. A cartograph for each environmental element is then generated.

5. Cartographs of the Environmental Risk Index (ER_i). The product of the values of the Probability of Contamination Indicators and the Environmental Values determines and cartographs the Environmental Risk Index (ER_i) for each environmental component.

6. Cartographs of the Landfill Suitability Index (LSI). Finally, the cartograph of the LSI is obtained by means of multi-criteria analysis (MCA). The factors used are the different Environmental Risk Indices for each environmental component (surface water, ground water, atmosphere, soil and human health). The value associated with each pixel of the map gives a final indication of the suitability of the site.

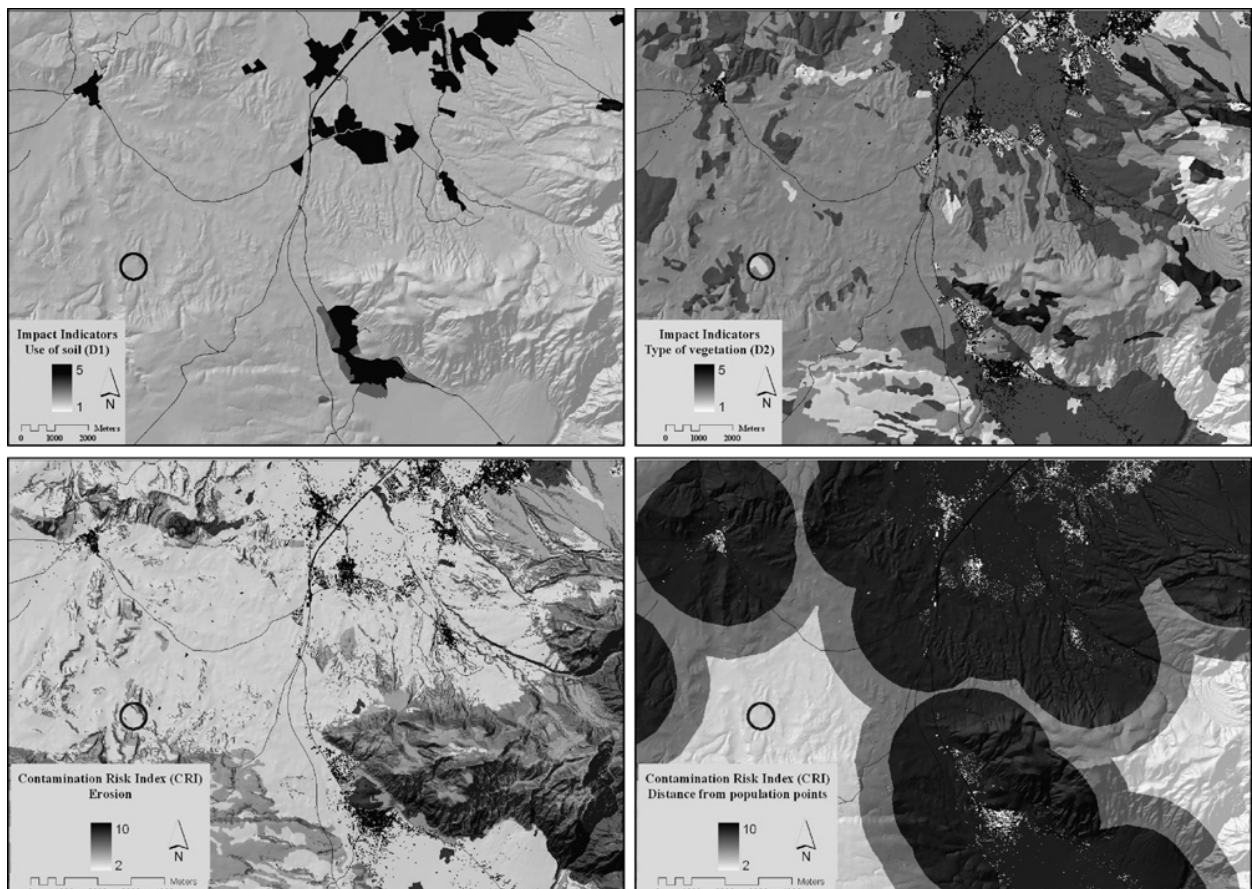
4.3.5.4. Analysis of model sensitivity.

Sensitivity analyses are directly related to modeling in any scientific field. A model is always a simplified version of reality which enables us to describe a specific problem, and thus reach a better understanding of it through the representation of essential elements and mechanisms of real world systems, whether physical, social, economic or environmental. In order to demonstrate that a model is a reliable representation of such a real system, it is necessary to carry out certain validation processes to lend sufficient credibility to the model. In this research, we verify the method used, and also carry out a results validation test as well as a model stability analysis.

4.3.6. Application of the methodology: results and discussion.

At the first level Impact Indicators and Contamination Risk Indices for variables were identified, classified and quantified. Each variable and Impact Indicator were modeled, and a cartograph for each one was generated. Fig. 3 shows an example of Impact Indicators D1 (Soil use) and D2 (Vegetation type) for the environmental component soil in the area studied. Both have values between 1 and 5, and at the landfill site, their respective values are low.

Fig. 4.3 shows too an example of the cartograph of the Contamination Risk Index in the case of the variables erosion and distance to population points in the area. Both have values between 2 and 10, and at the landfill site their respective values are low. A similar cartograph was generated for the rest of the Impact Indicators and



4.3.3. • Cartograph of impact indicators D1 (Soil use) and D2 (Vegetation type) and Contamination Risk Index for variables erosion and distance to population centers in the studied area. Circles indicates landfill site

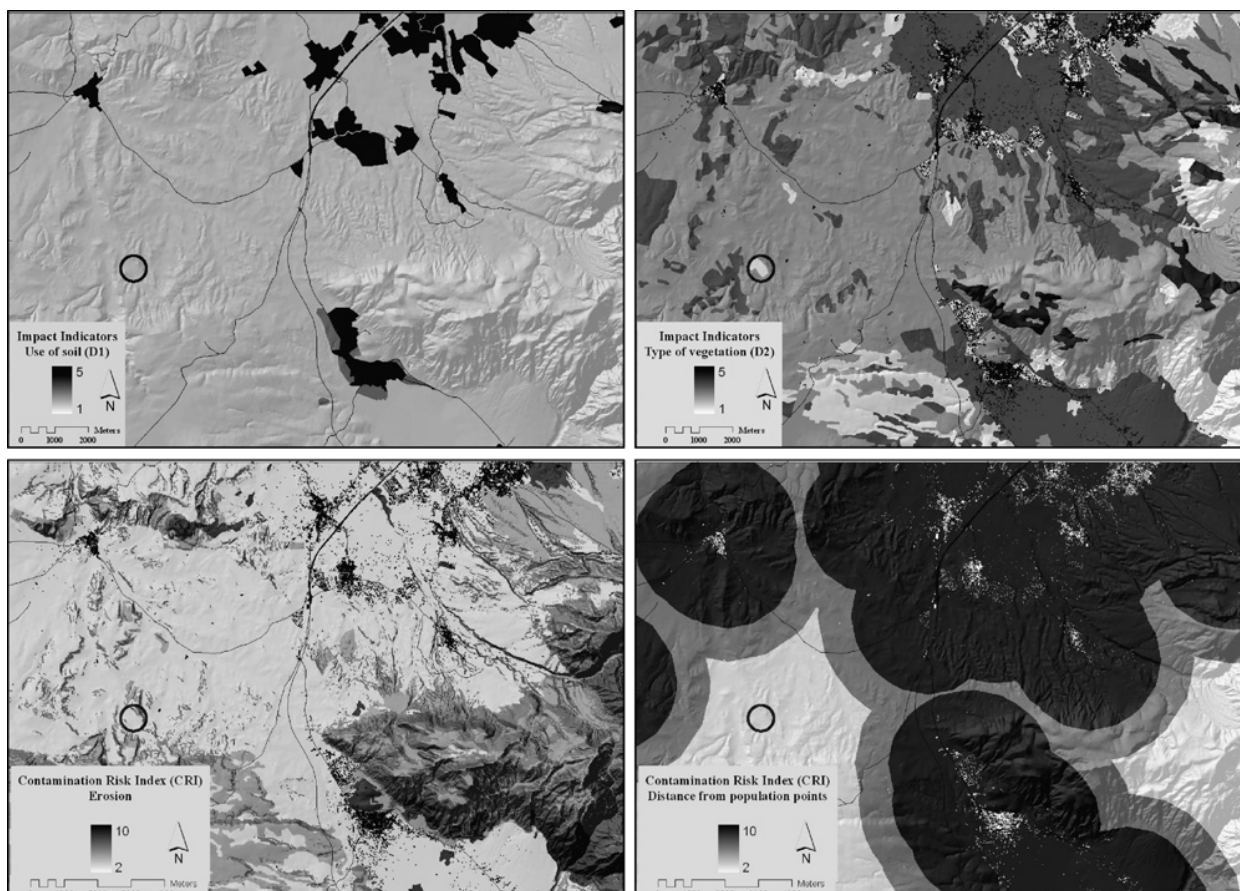
variables.

At the second level Environmental Values and Probability of Contamination Indicators for each environmental component were calculated, taking into account results from level 1. Some maps were obtained for the other environmental components. In this case Environmental Values in the area studied obtained values between 1–3, 1–4, 4–5 and 1–4 for surface water, groundwater, atmosphere and soil, respectively. Human health always has a maximum Environmental Value. The landfill site shows very low values for surface water, groundwater and soil ($eV = 1$), whereas it has very high values for atmosphere and human health ($eV = 5$). Atmosphere has a maximum value because the landfill is located far away from cities and industrial areas. As a result, the air quality at the site before the existence of a landfill was very high. Low values for this index indicate environmental character-

istics of lesser importance at the location that should be protected from the negative impact of landfill emissions.

The Probability of Contamination Indicator for the environmental components reflects the greater or lesser possibility of environmental impact, and takes into account a wide range of factors, not only those that contribute to interactions between the landfill and environmental components. Fig. 4 shows the Probability of Contamination for the environmental components surface water and ground water in the area. A similar cartograph was obtained for the rest of the components. In this case the Probability of Contamination Indicator in the area obtained values between 0.13–0.68, 0.16–0.41, 0.6, 0.2–0.6 and 0.35–0.85 for surface water, ground water, atmosphere, soil, and human health, respectively.

The landfill site has an index of Improbable for ground



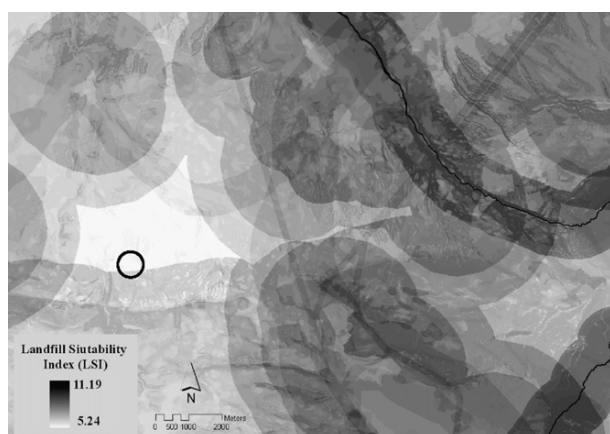
4.3.4. • Cartograph of Probability of Contamination Indicator for surface water and ground water and Environmental Risk Index for ground water and soil in the studied area. Circles indicates landfill site.

water ($Pbc = 0.19$) and Seldom probable for surface water ($Pbc = 0.32$), soil ($Pbc = 0.2$) and human health ($Pbc = 0.35$). The environmental component atmosphere shows a rather higher value, and is thus landfill site does not have characteristics which might contribute to the contamination of the different environmental components, except in reference to atmosphere. In this case, the landfill could have an impact, influenced by high rainfall, seismic risk in the area, and wind characteristics.

The third level generates the Environmental Risk Index for each environmental component with a view to discovering which was most affected by the presence of the landfill. Fig. 4 shows too a cartograph of the index for the environmental components, ground water and soil. Similar maps were obtained for the rest of the environmental components. The index values for the area are 0.13–2.04, 0.16–1.64, 2.40–3, 0.2–2 and 1.75–4.25 for surface water,

ground water, atmosphere, soil, and human health, respectively. The landfill at the site obtained values, which are very low for surface water ($ERI = 0.32$), groundwater ($ERI = 0.19$) and soil ($ERI = 0.2$). The index is also low for human health ($ERI = 1.5$), whereas it is very high for atmosphere ($ERI = 3$). The Environmental Risk Index for the landfill site indicates that the environmental risk for all the components, except atmosphere, is not important. This signifies that the landfill site is suitable except for this environmental component. In this case the high quality of the air and the high Probability of Contamination Indicators because of rainfall, wind and seismic risk contribute to a higher risk of contamination for this specific component.

Finally, the application of this methodology resulted in a Landfill Suitability Index, which reflects the overall environmental impact of a landfill. Fig. 5 shows the index



4.3.5. • Cartograph of Landfill Suitability Index in the area.

Circle indicates landfill site.

values obtained for the area studied. For example, locations that were far away from surface and ground water, infrastructures or population centers obtained a lower index. Consequently, they are regarded as suitable locations for municipal waste landfills. The values of this index in the area were between 11.2 and 5.2. The landfill at the site is in a place with an Index of 5.21, which is considered high to very high on the previously described scale.

4.3.7. Conclusions.

The method described in this chapter has been shown to be valid for the analysis of landfill sites. It generates indices that give information regarding site suitability, and which take into account only the environmental characteristics of the location. The final suitability index not only provides information about the optimality of the location, but also about potential problems that can affect one or more environmental components. This data is fundamental for any decision about whether or not to locate a landfill at a particular site. Based on the results obtained in our study as well as the sensitivity analysis carried out, we can conclude that Geographical Information Systems are a useful tool for the optimal siting of landfills. Our study shows that this instrument has the potential to assist planners, decision-makers and other agents involved in the process of selecting suitable sites for municipal landfills since it increases their knowledge of the physical terrain, thus facilitating the analysis and implementation of action plans.

Although atmosphere was the environmental component

that was most affected, the results obtained show that the landfill evaluated in our study is operating at a site with low index values, and thus is a generally suitable location for this purpose.

References.

- [1] M.Z. Siddiqui, Landfill siting using Geographic Information Systems: a demonstration, *Journal of Environmental Engineering* 122 (6) (1996) 515-523.
- [2] S. Leao, I. Bishop, D. Evans, Spatial-temporal model for demand and allocation of waste landfills in growing urban regions, *Computers, Environment and Urban Systems* 28 (2004) 353-385.
- [3] Th. D. Kontos, D.P. Komilis, C.P. Halvadakis, Siting MSW landfills in Lesbos Island with a GIS-based methodology, *Waste Management and Research* 21 (3) (2003) 262-327.
- [4] H.-Y. Lin, J.-J. Kado, A vector-based spatial model for landfill siting, *Journal of Hazardous Materials* 58 (1998) 3-14.
- [5] K. Vaillancourt, P.-P. Waub, Environmental site evaluation of waste management facilities embedded into EUGENE model: a multicriteria approach, *European Journal of Operational Research* 139 (2002) 436-448.
- [6] J.-J. Kao, Multifactor spatial analysis for landfill siting, *Journal of Environmental Engineering* 122 (10) (1996) 902-908.
- [7] T.D. Kontos, D.P. Komilis, C.P. Halvadakis, Siting MSW landfills with a spatial multiple criteria analysis methodology, *Waste Management* 25 (2005) 818-832.
- [8] O. Al-Jarrah, H. Abu-Qdais, Municipal solid waste landfill siting using intelligent system, *Waste Management* 26 (3) (2006) 299-306.
- [9] K. Charnpratheep, Q. Zhou, B. Garner, Preliminary landfill site screening using fuzzy geographical information systems, *Waste Management and Research* 15(2) (1997) 197-215.
- [10] F. Calvo, B. Moreno, M. Zamorano, M. Szanto, Environmental diagnosis methodology for municipal waste landfills, *Waste Management* 25 (2005) 768-779.
- [11] A. Paolini, A. Ramos, M. Zamorano, Environmental diagnosis and planning actions for municipal waste landfills in Estado Lara (Venezuela), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (3) (2008) 752-771.
- [12] F. Calvo, B. Moreno, A. Ramos, M. Zamorano, Implementation of a new environmental impact assessment for municipal waste landfills as tool for planning and decision-making process, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (1) (2007) 98-115.
- [13] I.L. McHarg, *Design with Nature*, The Natural History Press, Garden City, NY, 1969.
- [14] R. Church, Geographical information systems and location science, *Computers & Operations Research* 29 (6) (2002) 541-562.
- [15] J.R. Jensen, E.J. Christensen, Solid and hazardous waste disposal site selection using digital geographic information system techniques, *The Science of the Total Environment* 56 (1986) 265-276.
- [16] D. Fatta, P. Saravanos, M. Loizidou, Industrial waste facility site selection using geographical information system techniques, *International Journal of Environmental Studies* 56 (1) (1998) 1-14.
- [17] M. Michaels, GIS expected to make landfill siting easier, *Geographical Information Systems* (February) (1991) 30-35.
- [18] J.J. Kao, W.Y. Chen, H.Y. Lin, S.-J. Guo, Network expert geographic infor-

- mation system for landfill siting, *Journal of Computer in Civil Engineering* 10 (4) (1996) 307–317.
- [19] K. Yoon, C.L. Hwang, *Multiple Attribute Decision Making: an Introduction*, Sage Publications Inc., London, UK, 1995.
- [20] M. Zeleny, *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill, New York, USA, 1982.
- [21] P. Antunes, R. Santos, L. Jordao, The application of Geographical Information Systems to determine environmental impact significance, *Environmental Impact Assessment Review* 21 (2001) 511–535.
- [22] U. Sarkar, S.E. Hobbs, P. Longhurst, Dispersion of odour: a case study with a municipal solid waste landfill site in North London, United Kingdom, *Journal of Environmental Management* 68 (2003) 153–160.
- [23] S.A. Geschwind, J.A. Stolwijk, M. Bracken, E. Fitzgerald, A. Stark, C. Olsen, J. Melius, Risk of congenital malformations associated with proximity to hazardous waste sites, *American Journal of Epidemiology* 135 (11) (1992) 1197–1207.
- [24] I.A. Leone, F.B. Flower, J.J. Arthur, E.F. Gilman, Damage to woody species by anaerobic landfill gases, *Journal of Arboriculture* 3 (1979) 221–225.
- [25] M. El-Fadel, A.N. Findikakis, J.O. Leckie, Environmental impacts of solid waste landfilling, *Journal of Environmental Management* 50 (1997) 1–25.
- [26] Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste, *Official Journal of the European Communities* L 182, 16 July 1999, 0001–0019.
- [27] C. Zeiss, Analytical framework for waste-facility siting, *Journal of Urban Planning and Development* 121 (4) (1995) 115–145.
- [28] G.F. Lee, R.A. Jones, Landfills and ground-water quality, *Ground Water* 29 (4) (1991) 482–486.
- [29] Y. Abu-Rukah, O. Al-Kofahi, The assessment of the effect of landfill leachate on ground-water quality—a case study. El-Akader landfill site-north Jordan, *Journal of Arid Environments* 49 (2001) 615–630.
- [30] M. Nevenka, C. Bozena, A. Marijan, A. Svetica, T. Zdenkan, Assessment of groundwater contamination in the vicinity of a municipal solid waste landfill (Zagreb, Croatia), *Water Science and Technology* 37 (8) (1998) 37–44.
- [31] M. Davies, D. Cornwell, *Introduction to Environmental Engineering*, McGraw Hill Higher Education, 1998.
- [32] BOE (Official Bulletin of Spain) nº 292, 7 December 1961. Decreto 2414/1961, de 30 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas. [Decree 2414/1961, 30th November: approval of Regulation governing hazardous, unsanitary, harmful and dangerous activities].
- [33] G. Kallergis, *Applied Hydrogeology*, Second ed., vol. 2, Technical Chamber of Greece, Athens, Greece, 2001.
- [34] M. Barcelona, J. Keely, W. Pettyjohn, *Contamination of Ground Water*, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, USA, 1990.
- [35] R. Stegmann, Landfill emissions and environmental impact: an introduction, *Curso superior sobre gestión y diseño de vertederos*, Club Español de Residuos, Madrid, Spain (2000) 4–13.
- [36] A. Christine, K. Brent, J. Steven, Environmental justice and toxic exposure: Toward a spatial model of physical health and psychological well-being, *Social Science Research* 36 (1) (2007) 48–67.
- [37] Y. Hong, S. Pan, Q. Shoa, F. Liu, Y. Duo, A study to define a standard health protection zone for sanitary landfill in Fu Shan city, *Waste Management & Research* 14 (1996) 505–510. [38] EPA, Environmental Protection Agency, Title 40 Subchapter I-Solid waste, 258 Criteria for Municipal Solid Waste Landfills, USA, 2000.
- [39] J. Trankler, C. Visvanathan, P. Kuruparan, O. Tubtimthai, Influence of tropical seasonal variations on landfill leachate characteristics. Results from lysimeter studies, *Waste Management* 25 (2005) 1013–1020.
- [40] A.F. Al-Yaqout, M.F. Hamoda, Evaluation of landfill leachate in arid climate. A case study, *Environment International* 29 (2003) 593–600.
- [41] H.J. Ehrig, Quality and quantity of sanitary landfill leachate, *Waste Management and Research* 1 (1) (1983) 53–68.
- [42] S. Karnchanawong, T. Ickeguchi, S. Kootatop, Characteristics of leachate produced from simulated landfill in tropical countries, *Water Science Technology* 31 (9) (1994) 119–127.
- [43] F.A. Al-Yaqout, P.A. Koushki, M.F. Hamoda, Public opinion and siting solid waste landfills in Kuwait, *Resources, Conservation and Recycling* 35 (4) (2002) 215–227.
- [44] M. Zamorano, E. Garrido, B. Moreno, A. Paolini, A. Ramos, Environmental diagnosis methodology for municipal waste landfill as tool for planning and decision-making process, *Sustainable Development and Planning* 1 (2005) 545–554.
- [45] S. Foster, Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy, *TNO Commun. Hydrog. Res. Proceed. Inform.* 38 (1987) 69–86.
- [46] L. Aller, T. Bennet, J. Lehr, R. Petty, G. Hackett, DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, Oklahoma, U.S. EPA/600/2-87-036, 1987, pp. 1–455.
- [47] N. Doerfliger, F. Zwahlen, EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment, in: Gunay, Jonshon (Eds.), *Int. Symp. on Karst Waters and Environ. Impacts* Natalia, Turkey, Balkema, Rotterdam, 1997, pp. 117–123.
- [48] M. Auge, Vulnerabilidad de acuíferos, *Revista Latino-americana de Hidrogeología* 4 (2004) 85–103.
- [49] A. Donnelly, M. Jones, T. O'Mahony, G. Byrne, Selecting environmental indicator for use in strategic environmental assessment, *Environmental Impact Assessment Review* 27 (2007) 161–175.
- [50] V.A. Cloquell-Ballester, R. Monterde-Diaz, M.C. Santamarina-Siurana, Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment, *Environmental Impact Assessment Review* 26 (2006) 79–105.
- [51] Council Directive 2000/60/EC of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, *Official Journal of the European Communities*, L 327, 22 December 2000, 0001–0073.
- [52] BOE (Official Bulletin of Spain) nº 209, 31 August 1988. Real Decreto 927/88, de 29 de Julio, por el que se aprueba el reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica. [Decree 927/88, 29th June: approval of the national Water Administration and Supply Law].
- [53] R.F. Noss, Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach, *Conservation Biology* 4 (1990) 355–364.
- [54] J.M. Gil-Sánchez, J. Alba-Tercedor, Ecology of the native and introduced crayfishes *Austropotamobius pallipes* and *Procambarus clarkii* in southern Spain and implications for conservation of the native species, *Biological Conservation* 105 (1) (2002) 75–80.
- [55] J. Alba-Tercedor, O. Sánchez, Un método rápido y simple para evaluar la calidad biológica de las aguas corrientes basada en el de Hellawell, *Limnetica* 4 (1988) 51–56.
- [56] S.-C. Park, S.-T. Yun, G.-T. Chae, I.-S. Yoo, K.-S. Shin, C.-H. Heo, S.-K. Lee, Regio-

nal hydrochemical study on salinization of coastal aquifers, western coastal area of South Korea, *Journal of Hydrology* 313 (3-4) (2005) 182-194.

[57] A.G. Triantafyllou, V. Evagelopoulos, S. Zoras, Design of a web-based information system for ambient environmental data, *Journal of Environmental Management* 80 (3) (2006) 230-236.

[58] <http://www.nrm.gov.au/monitoring/frameworks.html>.

[59] R. Margalef, *Ecología*, Omega, Barcelona, 1974.

[60] J. Bosque, *Sistemas de información geográfica*. [Geographical Information Systems.], Rialp, Madrid, 1997.

[61] J.I. Barredo, M. Gómez, *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. [Geographical Information systems and multicriteria evaluation in the organization of territory] Ed. Ra-Ma. Madrid, 2005.

[62] D. Tomlin, Cartographic modelling, in: D. Maguire, M. Goodchild, D. Rhind(Eds.), *Geographical Information Systems*, vol. 1, Longman, New York, 1991.

9 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

9.1. Result obtained regarding to the objectives of the thesis

Noted in the first chapter that the main objective of this thesis was to show, through the use of innovative engineering in the field, and progressively examples of multi-scale maps in an attempt to approach the representation of the temporal variable and spatial-temporal dynamics, and prove their practical usefulness in the field of spatial planning and in their teaching.

These images are not solely the result of designing an appropriate symbology and proper management of visual variables that are pointed in the second chapter, but also need for creation of the mediation of knowledge, some theories, methods and experience specific professional practice.

The methodologies, specific to different specialties or branches of knowledge, and presented throughout the nine chapters that comprise this document allow new interpretations of the territory and appear to help the understanding of the current territorial processes, its strong environmental dynamics and phenomena that occur in our cities.

The use of evaluation methods and criteria decision scenario generation and repo the suitability of the land, seem, in view of the results, useful tools in planning and decision making in complex and dynamic areas.

The methodology shown in chapter four shows its applicability to analyze the suitability of a place to locate a landfill by obtaining a final suitability index. However, analysis of the remaining indices obtained also facilitates the study of problems that may arise at the different elements of the environment, which ultimately will result in a decision regarding the possibility of placing or not landfill.

The maps obtained in the practical application also show

the ability of GIS for the optimal placement of equipment so unique and makes us sense the potential of this instrument will enable planners, decision makers or other actors to deepen their knowledge of the territorial situation, analyze and take action to correct future location of municipal landfills or other facilities or equipment in the territory.

It is increasingly acknowledged the unpredictability, the uncertainty of the decisions that guide the processes of urbanization in a globalized economy and freed from the physical factor of distance, in which any activity can develop almost anywhere. Quantitative analysis of accessibility and its impact on changes in land use that occur in the third chapter and applied in the fifth and sixth, appear to have, in view of the results, a significant potential as a tool in planning.

The analysis of population dynamics on the coast of Granada shows the trajectory experienced by the population in the settlement network shows, in short, two divergent trends in the evolution of settlement: first the strong vitality of the coastline and its area of influence, linked to its social and economic dynamism, on the other hand, it is evident decline of rural areas inside. The model tested in this area, at the territorial level is seen as possible, requires a validation process to fit more appropriately to local expectations. Sensitivity analysis and the same partial results of each factor now become potential scenarios to be analyzed.

The development of GIS and its analytical space-time through the series of land use, as well as putting on a set of explanatory variables using multi-criteria evaluation, permitting, in a modeling exercise prospectively identify possible scenarios of occupation. As is apparent in this experience, the combination of geo-referenced spatial information along with the possibility of applying algo-

rhythms accessibility to the transport network, integrated into a single model, manages to combine the principles of activity-based modeling with the location of applications and mobility, consistently. However, the main novelty of this application is in the mutual feedback between demographic and statistical analysis of spatial translation and the establishment of the surface potential of urban growth in different time horizons using evaluation methods and criteria decision.

In this sense, it is necessary to determine the validity of the analysis results, probably within it to be introduced, would have to incorporate new aspects to be considered relevant, due to changing conditions in the macro and microenvironment of the situation in question (changes in the biophysical, social, economic, political and technological).

The modeling developed in this work, the information generated and its suggestive plot, allowing a consistent approach to the intrinsic uncertainty of future horizons to establish and necessary for the implementation of integrated planning model helps planners, decision makers or others, to deepen their knowledge of the reality on the ground, analyze and take action, taking into account the needs and interests of the community and the vision they have of their own future in regard to land use, including threats and opportunities that lead each possible solution.

As for the geomatics models presented in chapter six, and far from seeking to challenge the validity or otherwise of these models of space-time simulation, its sensitivity or robustness, or the controversial issue of choosing one or the other spatial indexes for evaluation of their applicability or sensitivity to scale, of which there is very recent literature (Aguilera, 2010), were also discussions about the subjectivity or arbitrariness in some of the stages of modeling, limiting this section to highlight the most relevant contributions in the light of the results obtained on the methodology used.

The integration of territorial accessibility variables as factors in the simulation of urban growth can incorporate aspects such as non-Euclidean distances to access nodes in the network of high capacity and access to services and infrastructure of an urban consolidated which in our view, is one of the greatest contributions of this

work. The gradient of territorial accessibility adds the time dimension on the implementation of road infrastructure as crucial in the phenomenon of urban sprawl. The simulation scenario for 2006 and proposed for 2020, with the addition of new sections of motorway planned, was nurtured by these synthetic maps, and displayed as a useful tool for screening at the time of the phenomena of urban growth.

The use of indicators of spatial analysis to compare real and simulated scenarios (Berling-Wolff et al. 2004), along with metrics based on the exact location of the new growth and by successive buffers (Pascual et al. 2010), seems a interesting group to validate the results and check the adjustment, both in its formal structure as the location of this reality.

Their use to assess the outcome of the modeling horizon to 2020 makes possible the recognition and monitoring of structural changes that might induce in the countryside and an argument for the different actors in the processes of territorial planning and infrastructure. It is necessary however to note the difficulties and disadvantages based mapping and treatment have contributed to this work still needed work homogenization and filtration (using a simple cellular automaton) prior to format conversion, which can distort some way the accuracy of the values of the indices. The use of satellite images of such a resolution as an alternative to the maps used, and treatment raster metrics also could have solved some of these difficulties. In any case, it is not intended to be the most interesting aspect of the study.

Identification and spatial distribution of alterations in the fragile eco-landscape and methodological treatment by integrating the gradients of visual display and metrics of the evolution of the urban area and its proximity to sensitive areas, if they can be very useful for land management and landscape management, allowing to establish relationships between this condition and characteristics of the studied area and simulate possible future weakness. It would be interesting, therefore, in the early stages of planning (in the basic layout and projects in the analysis of alternatives) a more careful treatment of the units of landscape, its visual and fragile ecosystems affected.

The modeling developed in this chapter provides an

approach to future horizons to establish and landscape protection measures necessary to implement models of integrated planning. The maps generated for this purpose allow better understanding of the phenomena studied, the explanatory variables and possible scenarios of urban employment.

The experience of translating these methodologies for representing processes and flows of concern to engineers, architects, environmentalists and geographers, students of the School of Civil Engineering of Granada has undoubtedly been the most rewarding task and that has generated better results. The first experience was pleasantly satisfying. Uncertainty about such a substantial change, in which students must contend with a complex management software, became pleased with the quality of work and summary panels, which made possible the presentation of the best projects of the Association Contest Engineers and subsequent exposure of the winning. The results were excellent, the efforts of teachers and students in an exciting and complicated task as paid off, and final surveys corroborated the general impressions.

Among the difficulties in the way we can highlight those related to the high number of students and the need for appropriate equipment and classrooms, which was resolved in part by the use of a laptop per group, and those arising from a previous learning new software in the small time-span of a semester. This aspect and the special interest shown by students this tool can lead to greater concern, decompensated sometimes by the management software for the practical application of theoretical knowledge acquired.

However, despite the normal difficulties, over the following six courses are perceived better understanding of the theoretical and the substantial improvement in the quality of practical work and a remarkable enthusiasm and participation of students.

9.2. Future research

The result of this thesis have been published several articles and book chapters, and a dozen contributions to national and international conferences, workshops on teaching and research seminars. Cited the most representative:

Zamorano, M., Molero, E., Hurtado, A., Grindlay, A. y Ramos, A. (2008): Evaluation of a municipal landfill site in Southern Spain with GIS-aided methodology”, *Journal of Hazardous Materials*. 160(2-3): 473-81.

Molero, E., Grindlay, A. L. y Asensio, J.J. (2007). Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. *GeoFocus (Artículos) nº7*, p. 120-147.

Valenzuela, L.M., Molero, E. y Aguilera, F. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica. En Martínez Montes y Pellicer Almiñana (Dir.): *Organización y Gestión de Proyectos y Obras*. Mc Graw Hill.

Camacho, M.T., Molero, E. y Paegelow M. (2010): Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.): *Tecnologías de la Información Geográfica: La información geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. pp. 658-678.

Molero, E. y García, P. (2010): Gradientes de accesibilidad y transformación territorial: Una aportación a los estudios de fragilidad paisajística. VI CIOT Congreso Internacional de Ordenación del Territorio, Octubre 2010, Pamplona. pp. 1382-97.

Molero, E., Grindlay, A. L. y Rodríguez, M. I. (2007): Taller de planificación: Análisis territorial mediante Sistemas de Información Geográfica. Congreso sobre Innovación Docente. Universidad de Huelva

Cordero, L.; Rodríguez, M.I.; Grindlay, A.L. y Molero, E. (2010): Aplicación de las TICs a la Enseñanza del Urbanismo y la Ordenación del Territorio en la Ingeniería Civil. INDOTEC 2010. I Jornadas sobre innovación docente y adaptación al EEES en las titulaciones técnicas. Grana-

da. 9 y 10 de Septiembre de 2010.

Grindlay, A.L, Rodríguez, M.I. y Molero, E., (2008): Infraestructuras de abastecimiento y suburbanización en la cuenca del Segura: la transformación de las huertas tradicionales. II Congreso Internacional Paisaje e Infraestructuras. Asociación Española de la Carretera. Granada, noviembre de 2008. pp. 1-29

Rodríguez, M.I., Grindlay, A.L., Molero, F.E. (2008): Gestión integrada del agua y del territorio. VI Congreso Ibérico de Gestión y planificación del agua. Fundación Nueva Cultura del Agua. Vitoria, diciembre de 2008 pp.1-9. ISBN 978-84-88949-96-7

Grindlay, A.L, Rodríguez, M.I., Molero, E. y Urrea, M. (2008): Transformación espacial y relación entre planificación urbanístico-territorial e hídrica en la cuenca del Segura: los actuales retos de su nueva planificación hidrológica. VI Congreso Ibérico de Gestión y planificación del agua. Fundación Nueva Cultura del Agua. Vitoria, diciembre de 2008 pp.1-11 ISBN 978-84-88949-96-7

Grindlay, A.L, Molero, E. y Rodríguez, M.I, (2007): Desarrollo Infraestructural Hidráulico, Planificación Hídrica y Territorial en la cuenca del Segura: hacia una Planificación Integrada. V Congreso Internacional de Ordenación del territorio (CIOT), Málaga, noviembre de 2007

Grindlay, A.L., Hernández, E., Cortés, R. y Molero, E. (2004): Interacción accesibilidad-usos del suelo: Perspectivas de desarrollo litoral granadino ante el trazado de la Autovía del Mediterráneo. VI Congreso de Ingeniería del Transporte. Vol 4. Zaragoza.

Pérez, R., Molero, E., Valenzuela, L.M. y Matarán, A. (2004): “Aplicación de los sistemas de información geográfica para la elaboración de modelos predictivos del cambio en los usos del suelo”, El empleo de los SIG y la Teledetección en Planificación Territorial. Murcia. XI Congreso Nacional de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.

As new research lines to follow in the coming years I think very interesting continuation and maturation of the

methodology followed in the seventh chapter, its application to other metropolitan areas of Andalusia and its novel application in the old methods of urban planning. In the section teaching the recent award of an innovation project that part of the experience, with name “Application of ICT to teaching urban and regional planning in civil engineering” raises new and exciting possibilities in the approach of these methods to students.

In addition, the Master in Urban Planning from the University of Granada, recently approved, includes among its subjects the so-called “new map: The representation of space-time processes” and “Modelling future scenarios” which now have the learning-specific skills cartographic representation, iconic, numeric, graphic ... of complex phenomena. Also referred to several seminars for coordination with other subjects where you try to apply these tools within a postgraduate education, aimed at architects, civil engineers and other graduates related to urban development and planning.

Bibliografía y Referencias.....341

Bibliografía.

- AA.VV. (2009). Atlas de los paisajes de la región de Murcia. Región de Murcia, Dirección General de Urbanismo y Ordenación del territorio, Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio, 247 p.
- Abessi, O. y Saeedi, M. (2010): Hazardous Waste Landfill Siting using GIS Technique and Analytical Hierarchy Process. En *EnvironmentAsia* 3(2) pp. 69-78.
- Abu-Rukah, Y. y Al-Kofahi, O. (2001): The assessment of the effect of landfill leachate on ground-water quality, a case study: El-Akader landfill site, North Jordan. *Journal of Arid Environments*, 49, pp. 615-630.
- Ackerman, C.T. (2002): HEC-GeoRAS. An extension for support of HEC-RAS using ArcView. User's Manual. Version 3.1 Hydrologic Engineering Center, USACE, Davis, California (EE.UU.).
- Aguejedad, R. y Houet, T. (2008). Modélisation de l'étalement urbain d'une métropole française (Rennes) à l'aide du modèle Land Change : scénarios d'évolutions futures. Symposium Spatial landscape modelling: from dynamic approaches to functional evaluations. Toulouse, 3-5 de junio 2008; 12 pp.
- Aguilera, F., Valenzuela, L. M. y Botequilha, A. (2011). Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: A case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*. Vol 99.
- Aguilera, F. (2010). Aplicación de las métricas de ecología del paisaje para el análisis de patrones de ocupación urbana en el Área Metropolitana de Granada. *Anales de Geografía* vol. 30, num. 2
- Aguilera, F. et al. (2009). Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos. *Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, núm. 4, p. 57-80.
- Aguilera, F. (2008). Análisis Espacial para la ordenación eco-paisajística de la Aglomeración Urbana de Granada. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- Aguilera, F. (2006): Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *Geofocus (Artículos)*, nº 6, pp. 81-112.
- Aguilera, F., Soria, J.A. y Valenzuela, L.M. (2006): Explorando el crecimiento en la Aglomeración urbana de Granada: Un modelo basado en autómatas celulares. XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Universidad de Granada.
- Alberti, M. (2005). The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review* 28, 2: 168-192.
- Almeida, C.; Batty, M.; Monteiro, M.; Camara, G.; Soares-Filho, B.; Cerqueira, G.; Pennachin, C. L. (2003): Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27, pp. 481-509.
- Almeida, C.; Gleriani; Castejon y Soares-Filho, B.S. (2008): Using neural networks and cellular automata for modeling intra-urban land-use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, EUA, v. 22, n. 9, p. 943-963.
- Antunes, P., Santos, R. y Jordao, L. (2001). The application of Geographical Information Systems to determine environmental impact significance. *Environmental Impact Assessment Review*, 21, pp. 511-535.
- Arán, J. (2008): Modelo de análisis espacial para la evaluación de la capacidad de acogida del territorio en la ubicación de centrales fotovoltaicas conectadas a la red. PhD Thesis, Universidad de Granada.
- Autoridad portuaria de Motril (coord.) (2007): Estudio sobre el impacto económico del puerto de Motril. ESECA. Granada.
- Baker, W. L. y Cai, Y. (1992). The rule programs for multiscale analysis of landscape structure using the GRASS geographical information system. *Landscape Ecology* 7(4): 291-302.
- Barredo, J.I. y Gómez, M. (2005). Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordena-

- ción del Territorio. [Geographical Information systems and multicriteria evaluation in the organization of territory] Ed. Ra-Ma. Madrid.
- Batty, M. (1994): "Urban models 25 years on", *Environment and Planning B. Planning and Design*. Vol. 21. 5, pp. 515-517.
- Batty, M. (1995): "Cities, planning, design, computation and evolution" *Environment and Planning B. Planning and Design*. Vol. 22. pp. 379-382.
- Batty, M. y Xie, Y. (1999): *Modelling Urban Dynamics through GIS-based Cellular Automata*. *Computers, Environment and Urban Systems* 23 (3), pp 205-233.
- Benenson, I. y Torrens, P. (2006): *Geosimulation: Automata-based modelling of urban phenomena*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Berling-Wolff, S. y Wu, J. (2004). *Modeling urban landscape dynamics: A case study in Phoenix, USA*. *Urban Ecosystems*, vol 7, nº 3, Springer, pp. 215-240.
- Bishop, C.M. (1995): *Neural Networks for pattern recognition*. Oxford University Press, New York.
- Bladé, E., Gómez-Valentín, M. (2006): *Modelización del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones*. Monograph CIMNE Nº97. Barcelona.
- Blade, E., Sánchez, M., Sánchez, H. P., Niñerola, D. y Gómez, M. (2009): *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Una visión a partir del modelo HecRas*. Edicions UPC. Barcelona.
- Bosque, J. y Moreno, A. (2007): *Localización-Asignación y justicia/equidad espacial con Sistemas de Información Geográfica*, en Buzai, G.D. (comp.). *Memorias de la XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*. Universidad Nacional de Luján. Sociedad Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica. Luján.
- Bosque, J. y Moreno, A. (2004): *Sistemas de Información Geográfica y localización de instalaciones y equipamientos*. Ed. Ra-Ma. Madrid.
- Bosque, J., Díaz, M.A., Gómez, M., Rodríguez, V.M., Rodríguez, A.E. y Vela, A., (1999): *Un procedimiento, basado en un SIG, para localizar centros de tratamiento de residuos*. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 19, pp. 295-323.
- Bosque, J. et al. (1999). *Localización de centros de tratamiento de residuos: una propuesta metodológica basada en SIG*. *Anales de geografía de la Universidad Complutense*. 1999, 19, pp 295-323.
- Bosque, J. (1997). *Sistemas de Información Geográfica*. Ed. Rialp. Madrid.
- Bosque, J. y Franco, S. (1995): *Modelos de localización - asignación y evaluación multicriterio para la localización de Instalaciones no deseables*. Universidad de Alcalá. Serie geográfica Nº 5.
- Bouchon-Meunier, B. (1995): *La logique floue et ses applications*. Paris, Addison-Wesley, 257 pp.
- Brail, R.K. y Klosterman, R.E. (Eds.) (2001): *Planning Support Systems: integrating Geographic Information Systems, model, and Visualization Tools*. ISBN 1-58948-011-2 ESRI Press.
- Briassoulis, H. (2000): *Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modelling Approaches*. Regional Research Institute, West Virginia University.
- Brimicombe, A. (2003): *GIS, Environmental Modelling and Engineering*. Taylor and Francis.
- Buckley, R.C. (1991): *Environmental sensitivity mapping: a regional planning tool*. En: Buckley, R.C. (Ed.): *Perspectives in Environmental Management*, Springer, Heidelberg, pp. 35-46.
- Burel, F. y Baudry, J. (2002): *Ecología del Paisaje: conceptos, métodos y aplicaciones*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid-Barcelona-México.
- Buyantuyev, A., et al. (2009): *Multiscale analysis of the urbanization pattern of the Phoenix metropolitan landscape of USA: Time, space and thematic resolution*. *Landscape and Urban Planning* 2009.

- Buzai, G. D. (2006): Geografía y Sistemas de Información geográfica. En: Hiernaux D., Lindón, A. (Eds.). Tratado de Geografía Humana. Editorial Anthropos, Universidad Autónoma Metropolitana.
- Calvo, F. (2003): Metodología de diagnóstico y caracterización ambiental de vertederos de residuos urbanos para su control, cierre, sellado y reinserción al medio. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Calvo, F., Moreno, B., Zamorano, M. y Szanto, M. (2005): Environmental diagnosis methodology for municipal waste landfills. *Waste Management*, 25, pp. 68-79.
- Calvo, F., Moreno, B., Ramos, A., Zamorano M. (2007): Implementation of a new environmental impact assessment for municipal waste landfills as tool for planning and decision-making process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 11. pp. 98-115.
- Camacho, M.T., Molero, E. y Paegelow M. (2010): Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.): *Tecnologías de la Información Geográfica: La información geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. pp. 658-678.
- Campagna, M. (Ed.) (2005): *Gis or Sustainable Development*. Taylor & Francis CRC Press.
- Cauvin, C., Escobar, F. y Serradj, A. (2007-2008): *Cartographie thématique 5 vol*, París, Ed. Hermès Science.
- Centeno, T.M. y Góis, J.A. (2005): Integrating fuzzy images and heterogeneous data to support the ambient impact forecast. *Proceedings of XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. pp 3037-3044.
- Chang, N.B., Parvathinathan, G. y Breeden J.B. (2008): Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management* 2008; 87(1): 139-53.
- Cheng, J. Y Masser, I. (2003): Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China. *Landscape and urban Planning*, v 62, pp199-217
- Clark Labs (2006, 2010) <http://www.clarklabs.org/>
- Consejería de Turismo y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia (2001): Análisis, diagnóstico y propuestas sobre el paisaje del Área Metropolitana (Comarca de la Huerta de Murcia y Comarca de la Vega Media), 3 vol., Murcia: Dirección General de Ordenación del Territorio y Costas.
- Coquillard, P. y Hill, D.R.C. (1997): *Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Paris, Masson; 273 pp.
- Cordero, L.; Rodríguez, M.I.; Grindlay, A.L. y Molero, E. (2010): Aplicación de las TICs a la Enseñanza del Urbanismo y la Ordenación del Territorio en la Ingeniería Civil. *INDOTEC 2010. I Jornadas sobre innovación docente y adaptación al EEES en las titulaciones técnicas*. Granada. 9 y 10 de Septiembre de 2010.
- Costa H.B. (1982): *Edmund aviliaccao da producto de percolado do lixo y de la capacidad filtrante de aterras sanitarios*. Cuadernos Técnicos. Vol. 21 nº 90-99.
- Christakos, G., Bogaert, P. y Serre, M. (2002): *Temporal Gis: Advanced Funcions for Field- Based applications*. Springer.
- Cushman, S.A., McGarigal, K. y Neel, M. C. (2008): Parsimony in landscape metric: Strength, universality, and consistency. *Ecological Indicators* 8. pp 691-703.
- Dang Khoi, D. y Murayma, Y. (2010): Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam. *Remote Sensing*, 2, 1249-1272.
- De Floriani, L. y Magillo, P. (1993): Computing visibility maps on a digital terrain model. *Spatial Information Theory a Theoretical Basis for Gis. Lecture Notes in Computer Science*, 1993, Volume 716/1993, 248-269, DOI: 10.1007/3-540-57207-4_17.
- De Floriani, L. y Magillo, P. (2003): Algorithms for Visibility computation on Terrain: a Survey. *Representation and Processing of Spatial data in Geographic Information Systems*. Department of Computer and Information Sciences (DISI) of the University of Genova. Último acceso en Marzo de 2011 en <http://www.disi.unige.it/person/>

MagilloP/pub.html

Dekoning, G., Verburg, P., Veldkamp, A. y Fresco, O. (1999): Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador. *Agricultural Systems*, nº61, pp.77-93.

Decreto 3209/1974, de 30 de agosto, por el que se aprueba la Norma Sismorresistente PDS-1.

DGC (1999): Máximas lluvias diarias en la España Peninsular. Serie monografías, Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento). Madrid.

Díez, A.; Garrote, J.; Baíllo, R.; Laín, L.; Llorente, M.; Mancebo, M.J. y Pérez, F. (2008): Análisis del riesgo de inundación para planes autonómicos de protección civil: RICAM. En: I. Galindo, L. Laín y M. Llorente (eds.), *La gestión de los riesgos geológicos*. Instituto Geológico y Minero de España y Consorcio de Compensación de Seguros. Madrid.

Díez, A. y Pérez, J.A. (2003): Los SIGs en el Plan de Protección Civil de Ámbito Local ante el riesgo de inundaciones de Navalunga (Ávila, España). Seminario Euro-mediterráneo sobre Nuevas Tecnologías Aplicadas a la Gestión de Desastres. Foro Euro-mediterráneo sobre Prevención de Catástrofes. Dirección Gral. de Protección Civil (Ministerio del Interior). Madrid.

Diputación de Málaga (2002): Plan de Acción Estratégica para la Provincia de Málaga. Usos del Suelo y Territorio. Análisis de la Situación Ambiental.

Directiva 2000/60/EC de 23 Octubre de 2000 que establece el marco de acción para la Comunidad en materia de contaminación de aguas.

Directiva 1999/31/CEE del Consejo, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos.

Doan, J.H. (2003): *Geospatial Hydrologic Modeling Extension*. HEC-GeoHMS. User's Manual. Version 1.1 Hydrologic Engineering Center, USACE. Davis, California.

Dragicevic, S. y Marceau, D.J. (2000): A fuzzy logic approach for modeling time in GIS. *International Journal of Geographic Information Science* 14 (3), pp 225-245.

Duarte, O.G. (2000): *Técnicas difusas en la evaluación de Impacto Ambiental*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.

Dupuy, G. (1992): *L'urbanisme des réseaux. Théories et methods*. Armand Colin Éditeur, París.

Eastman, J.R. (2009): *Idrisi Taiga*. Worcester, MA: Clark University.

Eastman, J.R. (1996): *Uncertainty and Decision Risk in Multi-Criteria Evaluation*. Implementation for GIS Software Design. UN University International Institute for Software Technology Expert Group. Workshop on Software Technology for Agenda '21. Decision Support Systems; 26 febrero-8 marzo.

Eastman, J.R. y Jiang, H. (1996): *Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluation*. Second International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in natural Resources and Environmental Studies. Colorado, 21-23 Mayo; pp. 527-534.

Eastman, J.R. et al. (1993): *GIS and Decision Making*. Explorations in Geographic Information Systems Technology. Vol. 4 Ginebra, UNITAR European Office, 112 p.

Ebert, D.W. y Wade, T.G. (2000): *Analytical Tools Interface for Landscape Assessments (ATtILA) UserGuide: version 2.0* US Environmental Protection Agency. Office of Research and Development.

Edgers, L., Noble, J.J. y Williams, E. (1992): A biologic model for long-term settlement in landfills. Proceedings of the Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology, (M.A. Usmen and Y.B. Acat., eds), Cesme, Turkey, pp. 177-184.

El-Fadel, M., Findikakis, A.N. y Leckie, J.O. (1997): Environmental impacts of solid waste landfilling. *Journal of Environmental Management*, 50, pp. 1-25.

Environmental Systems Research Institute (2004). *ArcGis 9: Geoprocessing*, ESRI Inc, Redlands, California.

EPA. Environmental Protection Agency. (2000): *Title 40 Subchapter I-Solid waste*. 258 Criteria for municipal solid waste landfills.

Erkut, E. y Neuman, S. (1989): Analytical models for locating undesirable facilities. *European Journal of Op-*

rational Research, Vol. 40, pp. 275-291.

ESRI (1995-2011): www.esri.com

European Environment Agency (2007): land-use scenarios for Europe: qualitative and quantitative analysis on a European scale. EEA Technical Report, N°9/2007. ISSN 1725-2237.

Farrow, A. y Nelson, A. (2001): Modelación de la accesibilidad en ArcView 3. Una extensión para calcular el tiempo de viaje y obtener información sobre captación de mercados. CIAT

Felícísimo, M.A. (1994): Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicaciones en las Ciencias Ambientales, Oviedo, Pentalfa.

Ferber, J. (1999): Multi-Agent System. An Introduction to Distributed Artificial Intelligence, Harlow. England, Addison-Wesley.

Ferrer, M. (2003): Análisis de nuevas fuentes de datos para la estimación del parámetro número de curva: perfiles de suelos y teledetección. Cuadernos de Investigación C48. CEDEX. Madrid

Fisher, P. F. (1996): Extending the applicability of viewsheds in landscape planning. Photogrammetric engineering and Remote Sensing 62 (11). pp 1297-1302

Fitzpatrick et al. (2000): Speed prediction for two-lane rural highways. Department of Transportation. Federal Highway Administration. FHWA-RD-99-171. Washington D. C. USA.

Galán, P. (1999): "La red local y la accesibilidad como instrumentos del desarrollo territorial". II Congreso Nacional de Carreteras locales. Asociación Española de la Carretera. Torremolinos (Málaga).

García, J. C. (2000): SIG y Accesibilidad: Efectos de las nuevas Autopistas Orbitales de Madrid. Tecnologías Geográficas para el desarrollo Sostenible. Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá, pp. 623-639

Gardner, M. (1970): The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'Life'. Scientific American 23, 4, pp 120-123.

Gardner, R. H. (1999): RULE: A program for the generation of random maps and the analysis of spatial patterns. En Landscape Ecological Analysis: Issues and Applications, pp 280-303. Springer-Verlag, New York, USA

Gil, A. (2010): Directiva 2007/60/CE sobre evaluación y gestión de los riesgos de inundación. Investigaciones Geográficas nº51, pp. 271-274.

Gilman, E.F., Flower, F.B. y Leone, I.A. (1985): Standardized procedures for planting vegetation on completed sanitary landfills. Waste Management & Research, 3, pp. 65-80.

Godoy, M., Soares-Filho, B.S. (2005): Modelagem da dinamica intra-urbana no Bairro Savassi, Belo Horizonte, Brasil (no prelo). En: Câmara G. y Vieira, A.M. (Org.). Geoinformação em Estudos Urbanos. São José dos Campos: INPE, vol. 1, p. 1-11.

Gómez, M. y Barredo, J.I. (2005): Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio (GIS and multicriteria evaluation for urban and regional planning). Ed. Ra-Ma. Madrid. 279 pp.

Gómez, J.L. y Grindlay, A. (Dir.) (2008). Agua, Ingeniería y Territorio: La transformación de la cuenca del río Segura por la Ingeniería Hidráulica. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Confederación Hidrográfica del Segura. 2008

Gómez, D. (1992). Evaluación de impacto ambiental. Madrid, Editorial Agrícola Española.

Gutiérrez, J. (2007): Los sistemas de información geográfica en la planificación del transporte. En Camacho, M.T., Cañete, J.A., Chica, M. y Lara, J.J. (eds.): Información espacial y nuevas tendencias en las tecnologías de la información geográfica (TIGs). Universidad de Granada.

Gutiérrez, J. y Gómez, G. (1999). The impact of orbital motorways on intra-metropolitan accessibility: the case of Madrid's M-40. Journal of Transport Geography 7, pp. 1-15.

Gómez, M. y Barredo, J.I. (2005): Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordena-

ción del Territorio. Madrid. Ed. Ra-Ma.

Gómez, M. y Bosque, J. (2004): "Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones", *Geofocus* (Artículos), nº 4, p. 179-208.

Grijota, J. y Asenjo, V. (2010). Revisión comentada del concepto de umbral visual. Aplicación a la delimitación de un área máxima de trabajo para estudios de afección al paisaje. En Iglesias Merchán, C. et al. *Estudios de paisaje: Ámbitos de estudio y aplicaciones prácticas*. ECO-PÁS (Ed.). Madrid. 147 pp.

Grindlay, A.L, Rodríguez, M.I. y Molero, E., (2008): Infraestructuras de abastecimiento y suburbanización en la cuenca del Segura: la transformación de las huertas tradicionales. II Congreso Internacional Paisaje e Infraestructuras. Asociación Española de la Carretera. Granada, noviembre de 2008. pp. 1-29

Grindlay, A.L, Rodríguez, M.I., Molero, E. y Urrea, M. (2008): Transformación espacial y relación entre planificación urbanístico-territorial e hídrica en la cuenca del Segura: los actuales retos de su nueva planificación hidrológica. VI Congreso Ibérico de Gestión y planificación del agua. Fundación Nueva Cultura del Agua. Vitoria, diciembre de 2008 pp.1-11 ISBN 978-84-88949-96-7

Grindlay, A.L, Molero, E. y Rodríguez, M.I, (2007): Desarrollo Infraestructural Hidráulico, Planificación Hídrica y Territorial en la cuenca del Segura: hacia una Planificación Integrada. V Congreso Internacional de Ordenación del territorio (CIOT), Málaga, noviembre de 2007.
Grindlay, A.L., Hernández, E., Cortés, R. y Molero, E. (2004): Interacción accesibilidad-usos del suelo: Perspectivas de desarrollo litoral granadino ante el trazado de la Autovía del Mediterráneo. VI Congreso de Ingeniería del Transporte. Vol 4. Zaragoza.

Gupta, R., Kewalramani, M.A. y Ralegaonkar, R.V. (2003): Environmental impact analysis using Fuzzy Relation for landfill siting. *Journal of Urban Planning and Development*, 129(3), pp. 121-139.

Hansen, W.G. (1959): How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25, pp. 73-76.

Hassan, M. K. (2003): Planificación de sistemas UMTS mediante sistemas de información geográfica. Tesis doctoral. Universidad politécnica de Valencia.

Henríquez, C. (2007): Propuesta de modelos predictivos en la planificación territorial y evaluación de impacto ambiental. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias sociales*. Universidad de Barcelona. ISSN: 1138-9788. Vol. XI, núm. 245

Henry, M. (1997): Notion de modele et modélization en l'enseignement. En: Enseigner les probabilités au lycée. Reims: Commission Inter-IREM. pp.77-84.

Herold, M., Couclelis, H. y Clarke, K. C. (2005): The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems* nº 29, pp. 369-399

Herrera, M.A., Aznar, F., Zamorano, M. y Alameda, E. (2010): Optimal location of a biomass power plant in the province of Granada analyzed by multi-criteria evaluation using appropriate Geographic Information System according to the Analytic Hierarchy Process.

Hidalgo, F. (2003): Análisis multicriterio para la óptima ubicación de una central de energía a partir de biomasa en Andalucía. Tesis Doctoral, Universidad Pablo de Olavide de Sevilla.

Instituto Geográfico Nacional: www.ign.es/ign/layoutIn/corineLandCover.do (acceso marzo de 2011)

Jiménez, A. (2007): El mapa de caudales máximos en España. En: *Jornadas sobre Gestión de Zonas Inundables*. Dirección General del Agua (Ministerio de Medio Ambiente). Gijón.

Johnston, R.A. y De La Barra, T. (2000): "Comprehensive regional modeling for logrange planning: linking integrated urban models and geographic information systems", *Transportation Research. Part A* . Vol. 34,. Pergamon. pp. 125-136.

Kanevski, M. y Maignan, M. (2004): Analysis and modeling of spatial environmental data. EPEL Press, 288 pp.

Kao, J-J., Multifactor spatial analysis for landfill siting.

- (1996): *Journal of Environmental Engineering*, 122(10), pp. 902-908.
- Komilis, D.P., Ham, R.K. y Stegmann, R. (1999): The effect of municipal solid waste pretreatment on landfill behavior: a literature review. *Waste Management and Research*, 17, pp. 10-19.
- Kontos, Th.D., Komilis, D.P. y Halvadakis, C.P. (2003): Siting MSW landfills in Lesbos Island with a GIS-based methodology. *Waste Management and Research*, 21(3), pp. 262-27.
- Lai, T.L. y Wong, S. (2001): Stochastic Neural Networks With Applications to Nonlinear Time Series. *Journal of the American Statistical Association*, vol 96, n° 455, Theory and Methods.
- Langlois, A. y Philipps, M. (1997): *Automates cellulaires*. Paris, Hermès, 197 pp.
- Legendre, L. y Legendre, P. (1984): *Écologie numérique*, 2ième éd. Tome 2: La structure des données écologiques. Masson, Paris. Presses de l'Université du Québec. viii + 335 pp.
- Li, X. y Gar-On, A. (2002): Neural network based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 16:4, 323-343.
- Lin H-Y, y Kado, J-J. (1998): A vector-based spatial model for landfill siting. *Journal of Hazardous Materials*, 58, pp. 3-14.
- Longley, P. y otros (1994): "The predictive use of GIS to model property valuations". *International Journal of Geographical Information Systems*. Vol. 8. pp. 217-235.
- Llorente, M., Díez-Herrero, A. y Laín, L. (2009): Aplicaciones de los SIG al análisis y gestión del riesgo de inundaciones: Avances recientes. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* n°29. pp.29-37.
- Maidment, D.R. (Ed.) (2002): *Arc Hydro. GIS for Water Resources*. ESRI Press. Redlands.
- Marioni, O. (2004): "Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS". *Computers and Geosciences*, 30, 6, pp. 637-646.
- Marr, P. y Sutton, Ch. (2007): Changes in accessibility in the Meseta Purépecha region of Michoacán, Mexico: 1940-2000. *Journal of Transport Geography* 15 (6). Pp. 465-475.
- Martín, J.M. (2003): *Modelos Multicriterio difusos: Aplicaciones*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Mas, J.F., Puig, H., Palacio, J.L. y Sosa-López, A (2004): Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. *Environmental Modelling & Software*, Volume 19, Issue 5, pp. 461-471.
- Mas, J.F., Vega P.A., Clarke, K. (2010): Assessing simulated land use land use/cp /excover maps using similarity and fragmentation indices. *ASPRS Annual Conference Proceedings. Opportunities for Emerging Geospatial Technologies. 2010 Annual Conference Final Program April 26-30*. San Diego, California.
- Mas J.F., Kolb, M., Houet T., Paegelow M., y Camacho, M.T. (en prensa): Eclairer le choix de modèles de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. *Revue Internationale de Géomatique*, Volume Francia.
- Matich, D.J. (2001): *Redes Neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones*. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario.
- Matteucci, S. D. y Silva, M. (2005): Selección de métricas de configuración espacial para la regionalización de un territorio antropizado. *GeoFocus (Articulos)*, n5, pp. 180-202.
- Matthews, R., Gilbert, N., Roach, A. Polhill, J. y Gotts, N. (2007): Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology*. Springer Netherlands. vol. 12 (10), pp 1447-1459.
- McBean, E., Rovers, F. y Farquhar, G. (1995): *Solid Waste Landfill Engineering and Design*. Prentice-Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- McGarigal, K., Cushman, S.A., Neel, M.C., y Ene, E.

- (2002): FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. University of Massachusetts, Amherst. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- McHarg, I.L. (2000): *Proyectar con la naturaleza*. Ed. Gustavo Gili. Barcelona.
- Mena, C., Gajardo, J. y Ormazábal, Y. (2006): Spatial Modeling by means of geomatic and multicriteria evaluation for territorial arrangement. *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Tarapacá*. Vol. 14. Nº 1 pp. 81-89
- Mendes, J.; Rodrigues, D. y Ramos, R. (2005): A GIS-based multicriteria model for the the evaluation of territorial accessibility. En Kungolos, A. ; Brebbia, C. A. ; Beriatos, E., ed. lit. - "Sustainable Development and Planning II". Southampton : Witpress. pp. 795-804.
- Metropolis, N. y Ulam, S. (1949): The Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, 44; pp. 335-341.
- Molero, E. y García, P. (2010): Gradientes de accesibilidad y transformación territorial: Una aportación a los estudios de fragilidad paisajística. VI CIOT Congreso Internacional de Ordenación del Territorio, Octubre 2010, Pamplona. pp. 1382-97.
- Molero, E., Grindlay, A. L. y Asensio, J.J. (2007). Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio. *GeoFocus (Artículos)* nº7, p. 120-147.
- Molero, E., Grindlay, A. L. y Rodríguez, M. I. (2007): Taller de planificación: Análisis territorial mediante Sistemas de Información Geográfica. Congreso sobre Innovación Docente. Universidad de Huelva
- Moon, D. y Chaudhry, S. (1984): An Analysis of Network location problems with distance constraints. *Management science*, vol 30, nº3 pp. 290-307.
- Moreno, A. (coord.). (2005): *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGis*. Ed. Ra-Ma. Madrid.
- Muñoz, J. (2002): "La prevención y lucha contra las avenidas". En Cánova, J. y Melgarejo, J. (coords.): *La Confederación hidrográfica del Segura 1926-2001. 75º Aniversario*. CHS. Ministerio de Medio Ambiente. pp. 97-113.
- Muñoz, J.L. (2002): AQUALIS: Aplicación sobre el SIG ArcView para el cálculo de precipitaciones máximas diarias en cuencas con MAXPLU. Proyecto Fin de Carrera, EUIT Forestales. Disponible en Internet en: <http://www.geocieties.com/infoaqualis/>.
- Ocaña, C., Gómez, M. L. y Blanco, R. (2004): las vistas como recurso territorial. Ensayo de evaluación del paisaje visual mediante un SIG. Universidad de Málaga.
- Olivera, F.; Bodoque, J.M. y Longsdon, K. (2006): Herramientas cartográficas y su conexión con modelos hidrológicos e hidráulicos. En: A. Díez-Herrero, L. Laín y M. Llorente (eds.), *Mapas de peligrosidad de avenidas e inundaciones. Métodos, experiencias y aplicaciones*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España, Serie Medio Ambiente. Riesgos Geológicos 7: 143-157. Madrid.
- Oliveira, H., Soares-Filho, B. S. y De Souza Costa, W.L. (2007): Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE*, pp 3089-3096
- Pablo, F.; Muñoz, C. y Myro, R. (2002): Un análisis del efecto de la inversión en infraestructuras sobre la accesibilidad del territorio a la red viaria de alta capacidad. XXIX Reunión de Estudios Regionales.
- Paegelow, M. y Camacho, M.T. (coord.) (2008): *Modelling environmental dynamics. Advances in geomatic simulations. Series Environmental Science*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Paegelow, M. y Camacho, M.T. (2005): Possibilities and limits of prospective GIS land cover modeling - a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *International Journal of Geographical Information Science*; vol. 19, nº 6; pp. 697-722.
- Paegelow, M.; Camacho, M.T. y Menor, J. (2003): Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje.

Geofocus, nº 3, pp. 22-44.

Parker, D.C., Evans T. P. y Meretsky, V. (2001): Measuring emergent properties of agent-based land-use/land-cover models using spatial metrics. En Proceedings of the Seventh Annual Conference of the International Society for Computational Economics, Junio de 2001, New Haven, CT.

Parker, D.C., Manson, S.M., Janssen, M.A., Hoffmann, M.J. y Deadman, P. (2003): Multi-Agent Systems for the simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. *Annals of the association of American Geographers*. Vol. 93 (2) pp. 314-337.

Parlitz, U. y Merkwirth, C. (2000): Nonlinear prediction of spatio-temporal time series. *ESANN'2000 proceedings*, Bruges, 26-28, pp. 317-322.

Pascual, V., Aguilera, F., Plata, W., Gómez, M. y Bosque, J. (2010). Simulación de modelos de crecimiento urbano: métodos de comparación con los mapas reales. En Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información geográfica: La información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. pp 1000-1013.

Peña, J. (2006): *Sistemas de Información geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Ed. Club Universitario. Universidad de Alicante.

Perera, A. H., Baldwin D. J. B., y Schneckenger F. (1997): LEAP II: A landscape ecological analysis package for land use planners and managers. Ontario Ministry of Natural Resources, Ontario Forest Research Institute, Forest Research Report 146. Sault St. Marie, Ontario, Canada.

Pérez, R., Molero, E., Valenzuela, L.M. y Matarán, A. (2004): "Aplicación de los sistemas de información geográfica para la elaboración de modelos predictivos del cambio en los usos del suelo", El empleo de los SIG y la Teledetección en Planificación Territorial. Murcia. XI Congreso Nacional de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.

Petry, F.E., Robinson, V.B. y Cobb, M.A.(eds.) (2005): *Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic*

Problems. New York, Springer.

Pijanowski, B.; Pithadia, S.; Shellito, B. y Alexandridis, K. (2005): Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States. *International Journal of Geographical Information Science*, Nº 19, Vol. 2, p. 197-215.

Plata, W.; Gómez, M. y Bosque, J. (2009): Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta Nova (Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales)*, Vol. XIII, núm. 293.

Plata, W., Gómez, M. y Bosque, J. (2010): Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la comunidad de Madrid. *GeoFocus (Artículos)*, nº10, p.103-134.

Pontius, R. y Malanson, J. (2005): Comparison of the structure and accuracy of two land change models. *International Journal of Geographical Information Science*, Nº19, vol. 2, pp. 243-265.

Pontius, R. G. Jr., Shusas, E. y McEachern, M. (2004): Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101, pp. 251-268.

Potrykoski, M. y Taylor, Z. (1984): *Geografía del Transporte*. Ed. Ariel.

Prato, T. (2007): Evaluating land use plans under uncertainty. *Land Use Policy*, vol. 24, pp. 165-174.

Qi, Y. y Wu, J. (1996): Effects of changing spatial resolution on the result of landscape pattern analysis using autocorrelation indices. *Landscape Ecology*, nº11, vol. 1, pp.39-49.

Raybould, J.G. y Anderson, D.J.(1987): Migration of landfill gas and its control – a case history. *Journal of Engineering Geology*, 20, pp. 75-83.

Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

Real Decreto 997/2002 de 27 de septiembre, por el que se aprueba la norma de construcción sismorresistente:

parte general y edificación (NCSR-02).

Rempel, R. (2010). Patch Analyst for ArcGis. Software Release Note 003. Centre for Northern Forest Ecosystem Research. Ontario Ministry of Natural Resources. <http://flash.lakeheadu.ca/~rempel/ecology>.

Rodríguez, M.I., Grindlay, A.L., Molero, F.E. (2008): Gestión integrada del agua y del territorio. VI Congreso Ibérico de Gestión y planificación del agua. Fundación Nueva Cultura del Agua. Vitoria, diciembre de 2008 pp.1-9. ISBN 978-84-88949-96-7

Rojas, I., Rojas, F. y Valenzuela, O. (2006): Herramientas avanzadas para la simulación de sistemas complejos. Material Didáctico. Universidad de Granada.

Salas, L. y Carrero, L. (2005). Aplicación "MAXIN". Estimación de la intensidad máxima anual en la España peninsular. E.U. Ingeniería Técnica Forestal (UPM). Madrid. Edición en CD-ROM.
<http://138.100.95.131/hidraulica/MAXINv2/APLICACION/principal.html>
(última visita 15-02-2008).

Salas, L. y Carrero, L. (2008). Estimación de la precipitación máxima anual para una duración y periodo de retorno determinados en la España peninsular mediante la aplicación informática MAXIN. E.U. Ingeniería Técnica Forestal (UPM). Madrid.
http://138.100.95.131/hidraulica/MAXIN_v2/MAXIN/manual%20de%20usuario.pdf
(Última visita 11-06-2011).

Sarkar, U., Hobbs, S.E. y Longhurst, P.(2003): Dispersion of odour: a case study with a municipal solid waste landfill site in North London, United Kingdom. *Journal of Environmental Management*, 68, pp. 153-160.

Saaty, T.L. (1998): "Método Analítico Jerárquico (AHP): Principios Básicos" en: Evaluación y decisión multicriterio. Reflexiones y experiencias. Editado por Eduardo Martínez y Mauricio Escudey. Editorial Universidad de Santiago, pp. 17-46.

Saaty, T.L. (1977): A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *J. Math. Psychology*, 15; pp. 234-281.

Santos, J. M. y García, F.J. (2008): Análisis estadístico de la Información geográfica. Ed. Uned Cuadernos. Madrid.

Santos, T. y Tellería, J. L. (2006). Pérdida y fragmentación del hábitat: efecto sobre la conservación de las especies. *Ecosistemas* 15 (2). Mayo de 2006.

Schultz R.E.O., Centeno, T.M. y Delgado, M.R.B.S. (2006): Spatio-temporal prediction by means of a fuzzy rule-based approach. *Proceeding of the IEEE International Conference on Fuzzy systems –FUZZ-IEEE'2006*, pp 6621-6628.

Serrano, M. M. (2006): "Propuesta metodológica para elaborar modelos de transporte y desarrollo urbano mediante teledetección y sistemas de información geográfica". Departamento de análisis geográfico regional y geografía física. Universidad Complutense de Madrid.

Shang, H. D. y Bishop, I. D. (2000). Visual thresholds for detection, recognition and visual impact in landscape setting. *J. Environ Psychol* 20: 125-140

Shannon, R.F. (1975): Simulation: A survey with research suggestions. *AIIE Transactions*, vol. 7, nº 3.

Siddiqui, M.Z. (1996): Landfill siting using Geographical Information Systems: a demonstration. *Journal of Environmental Engineering*, 122(6), pp. 515-523.

Silveira, B. y (2004): Dinamica v2.3.1.0 Belo horizonte, Centro de Sensoriamento Remoto (CSR), instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) y FINEP.

Siqueira A., Mello R., A (In press): Decision support method for environmental impact assessment using a fuzzy logic approach. *Ecological Economics*.

Sui, D.Z. (1994): GIS and Urban studies: Positivism, post-Positivism, and beyond. *Urban Studies* Vol. 45. 3. pp.258-278.

Sui, D.Z. (1998): GIS-based urban modelling: practices, problems and prospects. *International Journal Geographical Information Sciences*. Vol. 12. 7. pp. 651-671.

Sui, D.Z. (1998): "Deconstructing virtual cities: From unreality to Hyperreality". *Urban Geography*. Vol. 19. 7. pp.

657-676.

Sumathi, V.R., Natesan, U. y Sarkar, C. (2008): GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill” *Waste Management* 2008; 28 (11): 2146-60.

Swanwick, C. (2003): *Techniques and Criteria for Judging Capacity and sensitivity. Landscape Character Assessment. Guidance for England and Scotland.* The Countryside Agency and Scottish Natural Heritage, 19 pp.

Szanto M. (2000): *Vertederos controlados de residuos sólidos urbanos.* Aula de medio ambiente de Suances. Universidad de Cantabria.

Tchobanoglous G., Theisen H., y Vigil S. (1994): *Gestión Integral de Residuos Sólidos.* Mc Graw-Hill.

Theobald, D.M. (2007): *LCap v1.0: Landscape Connectivity and Pattern tools for ArcGis.* Colorado State University.

Theobald, D. y Hobbs, N. (1998): Forecasting rural land-use change: a comparison of regression and spatial transition-based models. *Geographical and Environmental Modelling*, Nº 2, Vol.1, p. 62-82.

Tomlin, D.(1991): *Cartographic modelling.* Maguire, D., Goodchild, M. and Rhind, D. (eds). *Geographical Information Systems.* Volume. 1, New York, Longman.

Vaillancourt, K. y Waub, J-P. (2002): Environmental site evaluation of waste management facilities embedded into EUGÈNE model: A multicriteria approach. *European Journal of Operation Research*, 139, pp. 436-448.

Valenzuela, L.M. (1998): *El marco territorial de las infraestructuras de transporte: accesibilidad, planificación y efectos.* UIM.

Valenzuela, L.M., Molero, E. y Aguilera, F. (2006). *Los Sistemas de Información Geográfica.* En Martínez Montes y Pellicer Almiñana (Dirs.): *Organización y Gestión de Proyectos y Obras.* Mc Graw Hill.

Varela, F.A. (2004): *Experiencias sobre los cálculos de accesibilidad mediante SIG.* En C. Conesa García, Y. Álvarez Rogel y C. Granel Pérez (Eds.) “*El empleo de los SIG y la Teledetección en Planificación Territorial*”. Grupo de

Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (AGE) y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia.

Verburg, P.H., Schot, P.P., Dijst, M.J. y Veldkamp, A. (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *Geojournal* 61(4), pp. 309-324.

Wainwright, J. y Mulligan, M. (2004): *Environmental Modelling: Finding simplicity in complexity.* Wiley.

Wegener, M. (2002): “*Land-Use Transport Interaction: State of the Art: What Can We Learn from North America?*” STELLA Genesis Kick-off meeting.

Wegener, M. y Fürst, F. (1999). *Land-Use Transport Interaction: State of the Art.* Report to the European Commission. *Berichte aus dem Institut für Raumplanung* 46. Dortmund: Institut für Raumplanung.

Weng, Q. (2002): Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS, and stochastic modeling. *Journal of Environmental Management*, Nº 64, p. 273-284.

Wu, J.G. (2008): Making the case for landscape ecology: an effective approach to urban sustainability. *Landscape J.* 27, pp. 41-50.

Wu, J., Jenerette, D. J., Buyantuyev, A y Redman, C.L. (2010): Quantifying spatiotemporal patterns of urbanization: The case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. *Ecological Complexity.*

Yager, R.R. (1988): On Ordered Weighted Averaging aggregation operators in multicriteria decision making, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 8(1), pp. 183-190.

Yagüe, J. (2007). *El Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.* En: *Jornadas sobre Gestión de Zonas Inundables.* Dirección General del Agua (Ministerio de Medio Ambiente). Gijón.

Yeh, A.G. y Li, X. (2001): A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using Gis. *Environment and Planning B* 28, pp 733-753.

Zadeh, L.A. (1965): Fuzzy sets. *Inf. Control* 8, pp 338-353
Zahonero, A. (2008): *Los Argumentos del Paisaje en la*

Ordenación del Territorio. Instrumentos de la Ordenación Territorial. Curso de Experto en Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. Escuela de Negocios de Andalucía. (ESNA). Granada.

Zamorano, M., Garrido, E., Moreno, B., Paolini, A. y Ramos, A. (2005): Environmental diagnosis methodology for municipal waste landfills as tool for planning and decision-making process. *Sustainable Development and Planning, Wessex Institute of Technology*, 1, pp. 545-554.

Zamorano, M., Molero, E., Hurtado, A., Grindlay, A. y Ramos, A. (2008): Evaluation of a municipal landfill site in Southern Spain with GIS-aided methodology”, *Journal of Hazardous Materials*. 160(2-3): 473-81.

Zamorano, M., Garrido, E. y Ramos, A. (2007): Diagnóstico ambiental de vertederos de residuos urbanos. Teoría y práctica. *Manuales de Ingeniería y tecnología*. Universidad de Granada.

Zhou, G. y Liebhold, A. (1995): Forecasting the Spatial Dynamics of Gypsy-Moth Outbreaks using celular transition models. *Landscape Ecology*, nº10, vol.3, pp. 177-189.

Índice de figuras y tablas.....	355
---------------------------------	-----

