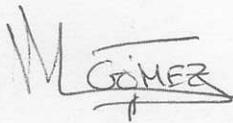


Alcalá de Henares, 21 de Mayo de 2010

Montserrat Gómez Delgado, Profesora Titular de Geografía Humana, Joaquín Bosque Sendra, Catedrático de Geografía Humana, y José Sancho Comíns, Catedrático de Análisis Geográfico Regional, los primeros como directores de la Tesis Doctoral y el último como Director del Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá,

Informan que el texto adjunto corresponde a la Tesis Doctoral de Wenseslao Plata Rocha, cuyo título es: *Descripción, análisis y simulación del crecimiento urbano mediante Tecnologías de la Información Geográfica. El caso de la Comunidad de Madrid.*

Esta tesis reúne los requisitos propios de este tipo de trabajo: rigor científico, aportaciones novedosas y aplicación adecuada de la metodología. Por tal motivo damos nuestro Visto Bueno a la presentación de dicha Tesis Doctoral



Montserrat Gómez Delgado

Joaquín Bosque Sendra

DIRECTORES DE LA INVESTIGACIÓN

José Sancho Comíns

DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO



Universidad
de Alcalá

Descripción, Análisis y Simulación del Crecimiento Urbano
Mediante Tecnologías de la Información Geográfica.
El Caso de la Comunidad de Madrid.

Tesis Doctoral presentada por:

Wenseslao Plata Rocha

Bajo la dirección de:

Dra. Montserrat Gómez Delgado

Dr. Joaquín Bosque Sendra

Departamento de Geografía

Programa de Doctorado en Cartografía,

Sistemas de Información Geográfica y Teledetección

Alcalá de Henares, Junio de 2010

A Marcia

A mis Padres

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a la Universidad de Alcalá de Henares, al Departamento de Geografía, al Director del departamento y al Coordinador del posgrado por haberme admitido en el programa de Doctorado en Cartografía, SIG y Teledetección, así como a su planta docente por haberme formado durante esta etapa.

Asimismo, deseo agradecer enormemente a la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) y a la Escuela de Ciencias de la Tierra (ECT) por darme la oportunidad de realizar estudios de doctorado otorgándome una beca académica.

También mi reconocimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP) de la UAS por la beca que me otorgaron para realizar los estudios de doctorado.

Asimismo, mi mas sincero agradecimiento a la Dra. Montserrat Gómez Delgado y al Dr. Joaquín Bosque Sendra quienes desde un principio me dieron la oportunidad de incorporarme en sus proyectos de investigación, fruto de los cuales es la presente tesis doctoral. Muy en especial agradecerles por sus tantas horas de trabajo dedicadas y a tan oportunas y acertadas observaciones y correcciones realizadas a este trabajo de investigación, mil gracias.

Igualmente agradecer a todos los integrantes del proyecto SIMURBAN por todas las aportaciones que hicieron en las tantas e intensas reuniones que sostuvimos durante estos 4 años.

Por su parte, agradecer al Dr. Ramón Victorino García López y al Dr. Manuel E. Trejo Soto, los cuales en sus etapas correspondientes como directores de la Escuela de Ciencias de la Tierra siempre me brindaron un apoyo total en todo momento. Asimismo, a mis compañeros de la ECT quienes siempre estuvieron pendientes del desarrollo de mi trabajo y de los cuales siempre tuve un aliento de ánimo para seguir adelante.

No puedo olvidar a mis padres, Hipólito y Alejandra, quienes desde pequeño me inculcaron el interés por el estudio, aunque hay que reconocer que no se me daba muy bien, pero su insistencia al fin, creo, dio resultado. Decirles que estos 4 años y medio lejos de ustedes, sin duda alguna, han valido la pena, Muchísimas Gracias por eso y por darme el apoyo, el cariño y ánimo para salir adelante en todo momento. Asimismo, a

Alma, mi hermana, quien siempre estuvo al pendiente, apoyándome desde la distancia en los momentos más difíciles de esta estancia, muchas gracias.

Tampoco puedo olvidarme de todos mis compañeros de doctorado, de mi generación y de otras, los amigos del sótano y del torreón, y otros, con los cuales he compartido momentos muy agradables, entre café y café, conversaciones intensas tanto académicas como rutinarias, y sobre todo las amenas reuniones y momentos de ocio que vivimos juntos.

A todos mis amigos de Culiacán y de Costa Rica, mi pueblo natal, quien mas de uno tuvo que soportar mis largas y pesadas pláticas sobre los modelos de crecimiento urbano, que aun sin comprender demasiado del tema, siempre me daban palabras alicientes para seguir tirando para adelante en los momentos difíciles y sobre todo el siempre *aquí lo estamos esperando, avísenos cuando vaya a venir para organizarle algo*, a todos muchísimas gracias.

Un profundo agradecimiento a Marcia, mi esposa, quien siempre estuvo apoyándome con todo su cariño, tanto al iniciar esta aventura, la cual se que no fue fácil, y sobre todo durante esta larga etapa, acompañándome en los momentos difíciles y dándome ánimos para salir de ellos, a quien seguro la atiborré con mis largas pláticas sobre esta investigación, aguantó mis ausencias mentales y sobre todo sobrellevó la distancia con su familia, muchas gracias Amor. Asimismo, valorar el apoyo que recibimos de su familia, sus padres, hermanos y sobrinos, quienes siempre estuvieron apoyándonos en una u otra cosa, dándonos el cariño, muy necesario cuando se está en la distancia y que sin ellos nos hubiera resultado muy difícil sobrellevar esta etapa.

Por último, y, no por ello menos importante, agradezco a Dios que durante estos años nos ha acompañado cuidando a nuestra familia y dándonos salud y su bendición.

Decir que muchos fueron los que de alguna manera creyeron y participaron en este trabajo de investigación, aunque es imposible nombrarlos a cada uno, les agradezco a todos.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|------------|
| RESUMEN | <i>i</i> |
| ABSTRACT | <i>iii</i> |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL | <i>1</i> |
| 1. INTRODUCCIÓN GENERAL..... | 2 |
| 1.1. Introducción..... | 2 |
| 1.2. Objetivos e Hipótesis..... | 9 |
| 1.3. Estructura de la tesis..... | 10 |
| 1.4. Bibliografía..... | 15 |
| | |
| CAPÍTULO 2. CAMBIOS DE USOS DEL SUELO Y EXPANSIÓN URBANA EN LA COMUNIDAD DE MADRID (1990-2000) | <i>17</i> |
| | |
| RESUMEN..... | 18 |
| ABSTRACT..... | 18 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 19 |
| 2. LOS DATOS DE PARTIDA. LA NECESIDAD DE UTILIZAR FUENTES DE DATOS HOMOGÉNEAS Y COMPARABLES..... | 23 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 24 |
| 4. ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS DE USOS DE SUELO OBSERVADOS PARA LA COMUNIDAD DE MADRID ENTRE 1990 Y 2000..... | 28 |
| 4.1. Descripción general a distintos niveles..... | 28 |
| 4.2. Análisis de las transiciones sistemáticas. ¿Son los cambios que se producen en la región realmente significativos? | 41 |
| 4.3. Análisis de distancia a la que se producen los cambios. ¿Con qué radio de influencia se producen los principales cambios respecto a la distribución de las distintas categorías en 1990? | 46 |
| 4.4. Distribución espacial de los cambios en general y de los relacionados con el crecimiento urbano en particular. | 48 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 56 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 57 |
| | |
| CAPÍTULO 3. FACTORS EXPLAINING LAND URBAN GROWTH IN MADRID REGION (SPAIN) BETWEEN 1990-2000 | <i>61</i> |

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | 62 |
| ABSTRACT..... | 62 |
| 1. INTRODUCTION | 63 |
| 2. METHODOLOGY..... | 65 |
| 2.1. Techniques used to study explaining factors in land use change..... | 65 |
| 2.2. Study area and available variables | 69 |
| 3. RESULTS..... | 71 |
| 3.1. Quantitative analysis of urban growth using: MLR, PLS and LR..... | 71 |
| 3.2. Probability of urban growth using explicative variables..... | 76 |
| 3.3. A study of the factors that influence urban growth using a Multilevel Model (Empty Model and Random Intercept Model) | 78 |
| 4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS..... | 79 |
| 5. ACKNOWLEDGMENTS..... | 81 |
| 6. REFERENCES..... | 81 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| ANEXOS COMPLEMENTARIOS..... | 85 |
|------------------------------------|-----------|

| | |
|--|-----------|
| ANEXO 1. ANÁLISIS DE FACTORES EXPLICATIVOS DEL CRECIMIENTO URBANO EN LA COMUNIDAD DE MADRID A TRAVÉS DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS Y SIG..... | 85 |
|--|-----------|

| | |
|--|----|
| RESUMEN..... | 86 |
| ABSTRACT..... | 86 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 87 |
| 2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS..... | 88 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 91 |
| 3.1. Regresión lineal múltiple..... | 91 |
| 3.2. Regresión por mínimos cuadrados parciales..... | 92 |
| 4. RESULTADOS..... | 94 |
| 4.1. Resultados de la RLM..... | 94 |
| 4.2. Resultados del ajuste de los modelos por mínimos cuadrados parciales PLS..... | 97 |

| | |
|-------------------------|-----|
| 5. CONCLUSIONES..... | 101 |
| 6. AGRADECIMIENTOS..... | 102 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA..... | 102 |

ANEXO 2. ANÁLISIS DE FACTORES EXPLICATIVOS DEL CRECIMIENTO URBANO EN LA COMUNIDAD DE MADRID A TRAVÉS DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS (RLO Y MLA) Y SIG..... 105

| | |
|---|-----|
| RESUMEN..... | 106 |
| ABSTRACT..... | 106 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 107 |
| 2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS..... | 108 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 110 |
| 3.1. Regresión logística espacial..... | 110 |
| 3.2. Análisis de regresión logística multinivel..... | 111 |
| 4. RESULTADOS..... | 113 |
| 4.1. Resultado del ajuste de los modelos de regresión espacial..... | 113 |
| 4.2. Resultados del modelo de regresión logística multinivel..... | 116 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 117 |
| 6. AGRADECIMIENTOS..... | 118 |
| 7. REFERENCIAS..... | 118 |

ANEXO 3. INCIDENCIA DE LA ZONIFICACIÓN DEL TERRITORIO EN LOS FACTORES EXPLICATIVOS DEL CRECIMIENTO URBANO DE LA COMUNIDAD DE MADRID..... 121

| | |
|---|-----|
| RESUMEN..... | 122 |
| ABSTRACT..... | 122 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 123 |
| 2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS..... | 124 |
| 2.1. Descripción del área de estudio..... | 124 |
| 2.2. Zonificación del área de estudio..... | 125 |
| 2.3. Datos. Análisis exploratorio de las variables disponibles..... | 128 |

| | |
|--|------------|
| 2.4. Análisis estadístico de la media de las variables por zona..... | 132 |
| 3. METODOLOGÍA. REGRESIÓN LOGÍSTICA ESPACIAL..... | 134 |
| 4. RESULTADOS..... | 135 |
| 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES..... | 142 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 142 |
| | |
| CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE MODELOS DE CRECIMIENTO URBANO ÓPTIMO PARA LA COMUNIDAD DE MADRID APLICANDO MÉTODOS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA..... | 145 |
| | |
| RESUMEN..... | 146 |
| ABSTRACT..... | 146 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 147 |
| 2. ÁREA DE ESTUDIO..... | 150 |
| 3. DATOS Y METODOLOGÍA..... | 151 |
| 3.1. Modelización de la asignación óptima de suelo urbano para el año 2000, partiendo de los datos de 1990..... | 154 |
| 3.1.1. <i>Criterios (factores y restricciones) utilizados y su tratamiento.....</i> | <i>154</i> |
| 3.1.1.1. <i>Factores ambientales.....</i> | <i>155</i> |
| 3.1.1.2. <i>Factores económicos.....</i> | <i>157</i> |
| 3.1.1.3. <i>Factores sociales.....</i> | <i>159</i> |
| 3.1.2. <i>Ponderación de los factores.....</i> | <i>160</i> |
| 3.2. Modelización de la asignación óptima de suelo urbano para el año 2020, partiendo de los datos reales de 2000 y los datos resultantes del modelo de asignación óptima para el año 2000. | 161 |
| 3.2.1. <i>Factores a incluir en los modelos.....</i> | <i>162</i> |
| 3.2.2. <i>Estimación de la demanda de suelo para el año 2020.....</i> | <i>164</i> |
| 4. RESULTADOS DEL MODELO DE ASIGNACIÓN ÓPTIMA PARA EL AÑO 2000. ANÁLISIS COMPARATIVO CON EL CRECIMIENTO REAL EXPERIMENTADO ENTRE EL PERÍODO DE 1990 A 2000..... | 165 |
| 5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL DESARROLLO URBANO “ÓPTIMO” PARA EL AÑO 2020..... | 169 |

| | |
|---|------------|
| 6. CONCLUSIONES..... | 173 |
| 7. AGRADECIMIENTOS..... | 174 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA..... | 174 |
| APÉNDICE 1..... | 179 |
| | |
| ANEXOS COMPLEMENTARIOS..... | 181 |
| | |
| ANEXO 4. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE DEMANDA DE SUELO URBANO EN ÁMBITOS METROPOLITANOS..... | 181 |
| | |
| RESUMEN..... | 182 |
| ABSTRACT..... | 182 |
| 1. INTRODUCCIÓN: DINÁMICA DE SISTEMAS Y SIG EN LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS PARA LA PLANIFICACIÓN METROPOLITANA..... | 183 |
| 2. ÁMBITO DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA..... | 185 |
| 2.1. Ámbito de estudio: las áreas metropolitanas de Madrid y Granada..... | 185 |
| 2.2. Los datos de partida..... | 187 |
| 3. METODOLOGÍA: EL MODELO DE DS Y LA GENERACIÓN DE LOS ESCENARIOS FUTUROS..... | 188 |
| 3.1. Descripción del modelo. El funcionamiento del modelo..... | 188 |
| 3.1.1. <i>La estimación de la evolución de la población.....</i> | <i>190</i> |
| 3.1.2. <i>La estimación de la evolución de los hogares.....</i> | <i>191</i> |
| 3.1.3. <i>La estimación de la evolución de los niveles de renta.....</i> | <i>192</i> |
| 3.1.4. <i>La estimación de la evolución de las viviendas y el suelo residencial.....</i> | <i>192</i> |
| 3.1.5. <i>La estimación de la evolución del suelo productivo.....</i> | <i>193</i> |
| 3.2. La calibración del modelo..... | 195 |
| 3.3. Los escenarios futuros..... | 197 |
| 3.3.1. <i>Escenario de tendencia.....</i> | <i>197</i> |
| 3.3.2. <i>Escenario de crisis.....</i> | <i>198</i> |
| 3.3.3. <i>Escenario de innovación y sostenibilidad local.....</i> | <i>198</i> |

| | |
|---|------------|
| 3.4. Escenarios futuros y variables del modelo de DS..... | 198 |
| 4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS..... | 199 |
| 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES..... | 202 |
| 6. AGRADECIMIENTOS..... | 204 |
| 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 204 |
| | |
| ANEXO 5. HERRAMIENTA PARA LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE USOS DEL SUELO..... | 207 |
| | |
| RESUMEN..... | 208 |
| ABSTRACT..... | 208 |
| 1. INTRODUCCION..... | 209 |
| 2. PLANTEAMIENTO DE LAS TÉCNICAS DE EMC UTILIZADAS..... | 210 |
| 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA..... | 212 |
| 4. APLICACIÓN DEL MODULO A UN CASO DE ESTUDIO..... | 214 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 219 |
| 6. AGRADECIMIENTOS..... | 220 |
| 7. REFERENCIAS..... | 221 |
| | |
| CAPÍTULO 5. SIMULATING URBAN GROWTH SCENARIOS USING GIS AND MULTICRITERIA EVALUATION TECHNIQUES. CASE STUDY: MADRID REGION, SPAIN..... | 223 |
| | |
| RESUMEN..... | 224 |
| ABSTRACT..... | 224 |
| 1. INTRODUCTION..... | 225 |
| 2. STUDY AREA AND DATA..... | 230 |
| 3. METHODOLOGY..... | 232 |
| 3.1. Qualitative interpretation of scenarios..... | 235 |
| 3.2. Urban land demand for the different scenarios..... | 235 |
| 3.3. Scenario implementation and spatial assignation rules..... | 236 |
| 3.3.1. <i>Business as usual scenario (S1)</i> | 238 |
| 3.3.2. <i>Crisis scenario (S2)</i> | 239 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.3. <i>Local innovation and sustainability scenario (S3)</i> | 240 |
| 4. RESULTS..... | 241 |
| 4.1. Allocation of future urban growth..... | 241 |
| 4.2. Evaluation of the changes in land occupation and distribution patterns of the new urban zones in the three scenarios..... | 244 |
| 5. CONCLUSIONS..... | 246 |
| 6. ACKNOWLEDGMENTS..... | 248 |
| 7. REFERENCES..... | 248 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 6. PROPUESTA DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EXPLÍCITAMENTE ESPACIAL PARA UN MODELO DE SIMULACIÓN DE CRECIMIENTO URBANO..... | 253 |
|--|------------|

| | |
|--|-----|
| RESUMEN..... | 254 |
| ABSTRACT..... | 254 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 255 |
| 2. ÁREA DE ESTUDIO, MODELO DE CRECIMIENTO URBANO Y DATOS..... | 259 |
| 2.1. Descripción del área de estudio..... | 259 |
| 2.2. Modelo de crecimiento urbano y datos..... | 261 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 264 |
| 3.1. Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test (E-FAST)..... | 265 |
| 3.2. Metodología de AS explícitamente espacial..... | 267 |
| 3.3. Integración del AS espacial y el método E-Fast..... | 270 |
| 4. RESULTADOS..... | 271 |
| 4.1. Resultados del AS aplicando el método E-Fast (3.1 y 3.3)..... | 271 |
| 4.2. Resultados del AS explícitamente espacial..... | 273 |
| 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES..... | 279 |
| 6. AGRADECIMIENTOS..... | 281 |
| 7. REFERENCIAS..... | 282 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES GENERALES..... | 287 |
|--|------------|

| | |
|---|-----|
| 7. CONCLUSIONES GENERALES..... | 288 |
| 7.1. Conclusiones..... | 288 |
| 7.2. Futuras líneas de investigación..... | 292 |

RESUMEN

En los últimos años se han puesto en evidencia los notables cambios de uso y ocupación del suelo que ha sufrido, en general, todo el planeta. Dentro de dichos cambios ocurridos, indiscutiblemente, uno de los más significativos ha sido el aumento desmesurado de las superficies artificiales.

En este sentido, la región de Madrid no es ajena a este proceso. De hecho, esta urbe es considerada uno de los focos críticos de la Unión Europea en lo que a desarrollo urbano se refiere, debido, principalmente, a que en los últimos 10-15 años ha experimentado un rápido proceso de urbanización, transformando, solo en la última década del siglo pasado, mas de 50.000 has de su territorio en superficies artificiales, configurándose así un nuevo modelo territorial aquejado de serios problemas de sostenibilidad, dentro del contexto de un marco débil de planeamiento urbano.

Ante esto se ha planteado como objetivo principal de la tesis: *describir, analizar y simular las dinámicas urbanas pasadas y futuras de la Comunidad de Madrid, utilizando para ello Técnicas de Análisis Estadístico, Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica.*

Para cumplir con dicho objetivo, por un lado, se aplicaron diferentes técnicas estadísticas para describir y analizar las dinámicas de los usos del suelo y el crecimiento urbano. Por su parte, para la simulación de los modelos de crecimiento urbano se utilizaron técnicas de evaluación multicriterio. Dichas técnicas también se utilizaron para la simulación de diferentes escenarios de futuro, las cuales no han sido ampliamente aplicadas para este fin. Por otro lado, con el fin de dar robustez y confiabilidad a los resultados obtenidos de los modelos se realizó un análisis de sensibilidad.

Los resultados obtenidos nos revelan, por un lado, el desmesurado crecimiento urbano ocurrido entre 1990 y 2000, crecimiento que se ha nutrido principalmente de zonas agrícolas y zonas forestales

Por su parte, el análisis del crecimiento urbano nos arrojó que existen algunos factores espaciales que de alguna manera han estado relacionados con dicho crecimiento, tales

como: la accesibilidad a carreteras, zonas urbanas, la pendiente y altitud del terreno, entre otras.

Mientras tanto, los modelos y escenarios desarrollados en este trabajo permitieron analizar los patrones de crecimiento urbano futuro en la Comunidad de Madrid a partir de diferentes alternativas. Para ello se simularon tres escenarios diferentes: tendencia, crisis, y de innovación y sostenibilidad. De este modo, los resultados ponen de manifiesto la divergencia que presenta el escenario de tendencia con las políticas europeas de medio ambiente y de transporte, generando una gran presión sobre el territorio y ocasionando daños irreversibles al medio ambiente. Mientras que un período de crisis económica hace que dichas tendencias se mantengan a la baja, no por la consideración de políticas ambientales en los procesos de planificación, sino por las particulares circunstancias de la situación de crisis. En dicho escenario deberán surgir nuevas pautas de urbanización y reorganización del espacio y de la economía, apuntando, principalmente, hacia las ciudades de tamaño medio que deberán desempeñarse como centros regionales. Por su parte, si consideramos la innovación como motor del desarrollo económico y la buenas prácticas en los procesos de planificación, nos encontramos con efectos positivos y deseables encauzando, de este modo, el modelo hacia un mayor desarrollo económico y social de la región, y minimizando los efectos adversos al medioambiente, debido, principalmente, a la inclusión de criterios de sostenibilidad en los procesos de planificación, al menor consumo de suelo requerido para las actividades productivas y al reciclado de suelo urbano.

Por último, con la finalidad de dar confiabilidad y obtener el grado de robustez de los modelos se aplicó un análisis de sensibilidad (AS) a los resultados obtenidos. Con dicho análisis se pudo detectar los factores más importantes, influyentes y/o significativos en los modelos, los cuales son: el uso del suelo, la accesibilidad a: carreteras, zonas urbanas y comercios; la protección de suelos de mayor productividad, la accesibilidad a hospitales y la distancia ponderada por la población más vulnerable y de mayor poder adquisitivo. Asimismo, se observó a partir de la cartografía de píxeles más veces seleccionados que el modelo de crecimiento urbano de futuro presenta un alto grado de robustez.

ABSTRACT

Recently the significant changes in land use and land cover all over the world has been highlighted. Indeed, one of the most significant changes has been the disproportionate increase of artificial surfaces.

In this regard, Madrid region has not been exempt of this process. In fact, this city is considered one of the hotspots of the European Union concerning urban development. This process is reflected by the rapid urbanisation of the last 10-15 years that changed more than 50,000 hectares of its territory to artificial surfaces between 1990 and 2000. As a consequence, it constitutes a new territorial model with serious problems of sustainability, within the framework of a weak urban planning.

Thus, the main objective of the thesis is: to describe, analyze and simulate past and future urban dynamics of the Community of Madrid, using statistical analysis techniques, Multicriteria Evaluation (MCA) and Geographic Information Systems (GIS).

To achieve this objective, different statistical techniques to describe and analyze the dynamics of land use and urban growth were applied. Also, multicriterio techniques were used for simulation of urban growth. MCA is a technique that has not been widely used to simulate different scenarios. Furthermore, a sensitivity analysis was performed in order to provide robustness and reliability to the result of the models simulation.

The results reveal, in one hand, an uncontrolled urban growth occurred from 1990 to 2000. This growth has been mainly at the expense of agricultural and forest areas.

In the other hand, it was also found that urban growth is related with some spatial factors, such as: accessibility to roads and urban areas; slope and altitude, among others.

The models and scenarios developed in this study allowed to perform an analysis of the future urban growth patterns in the Community of Madrid from different perspectives. So, three different scenarios were simulated: business as usual, crisis, and innovation and sustainability. Thus, the results demonstrate the divergence presented by the business as usual scenario from European environmental and transport policies, generating considerable pressure on land and producing irreversible harm to the environment. Although a period of economic crisis maintains these trends at a

minimum, this is due to the specific context of a crisis, rather than to consideration of environmental policies during the planning process. In this scenario, new patterns of urbanization and spatial and economic reorganization should emerge, focusing primarily at medium sized cities acting as regional centre. When innovation is considered as the driving force behind economic development and good practice in the planning process, positive and desirable effects are observed, directing the model towards greater economic and social development in the region, and minimizing adverse effects on the environment, due mainly to the inclusion of sustainability criteria in the planning process, less consumption of land for productive activities and recycling of urban land.

Finally, in order to give robustness to the results of the models a sensitivity analysis (SA) was applied. This analysis allowed detecting the most important, influential and/or significant factors of the models, which are: land use; accessibility to roads, urban areas, mall and hospitals; protection of soils of higher productivity; the distance weighted by the most vulnerable population and greater purchasing power. It was also observed, from the cartography of the most frequent selected pixels, that the models show a high degree of robustness.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

En los últimos años se han puesto en evidencia las consecuencias de los cambios que en la ocupación y usos del suelo ha sufrido, en general, todo el planeta. Dichos cambios son el resultado de un complejo proceso entre el medio humano y natural. Se trata de un fenómeno muy importante, sobre todo, desde el punto de vista de la sostenibilidad, ya que dichos cambios han sido considerados como uno de los componentes más importantes del cambio global.

El análisis de la sostenibilidad conduce a considerar multitud de temas y problemas, pero uno de los más estudiados es, sin duda, el concerniente a la variación de las actividades desarrolladas en cada punto del territorio a lo largo del tiempo, es decir, al cambio en los usos y ocupación del suelo. De hecho, muchos consideran que esta cuestión es uno de los mejores indicadores de la sostenibilidad del modelo de desarrollo económico y social de una sociedad.

Dentro de los cambios ocurridos en las últimas décadas, indiscutiblemente, uno de los más significativos ha sido el aumento desmesurado de las superficies artificiales. Si bien las zonas urbanas ocupan hoy día tan sólo el 2 por ciento de la superficie de la tierra, sus efectos en la alteración del medio son importantísimos a escala local, regional y global (EEA, 2006; OSE, 2006). Esta importante dinámica urbana se ha venido desarrollando en diferentes regiones del mundo (principalmente Europa y Norte América), como un modelo de crecimiento urbano difuso, denominado *Urban Sprawl*. Este fenómeno se caracteriza por la propagación de la ciudad y sus barrios hacia las periferias, en espacios de carácter rural, donde predomina la estructura urbana unifamiliar, de baja densidad, estimulando o forzando el uso del automóvil como medio de movilidad cotidiano, ocasionando como consecuencia una enorme presión sobre el territorio y sus recursos naturales, y sobre la calidad de vida de las personas y sobre la sostenibilidad global del planeta (OSE, 2006).

En el caso de España, se está asistiendo a un fenómeno que tiende a transformar la realidad urbana de las ciudades evidenciándose, tanto a escala municipal, metropolitana o regional, una gran dispersión de la urbanización, con espacios urbanos que no tienen

continuidad física y que a menudo se encuentran a muchos kilómetros de distancia entre ellos (Azcárate Luxán *et al.*, 2008).

Dicho modelo ha producido una transformación del territorio sin precedentes, ocasionando serios problemas de sostenibilidad, debido, principalmente, a las enormes fuerzas extrínsecas que inducen los procesos de crecimiento urbano, todo esto bajo un ineficiente marco legal de planeamiento territorial que las contenga.

Ante esto, en los últimos años se han venido proponiendo políticas de desarrollo territorial con mira hacia un modelo más sostenible que re-direccionen las dinámicas ocurridas. Una de las propuestas más firmes es la cohesión territorial, la cual pretende un sistema urbano equilibrado y policéntrico, armoniosos con el medio rural y sostenible ambiental, económica y socialmente.

No obstante, la puesta en práctica de dichos procesos de planificación requiere la introducción de nuevos instrumentos innovadores, con capacidad de adaptación y actualización, para dar respuesta y soluciones efectivas a los conflictos territoriales derivados del acelerado crecimiento urbano.

Es aquí donde la ordenación del territorio ha de recurrir a las técnicas prospectivas como medio para alcanzar un modelo territorial sostenible en el tiempo y que se adapte a las nuevas necesidades que se presentan hoy en día.

Una alternativa puede ser optar por la nueva generación de modelos espaciales, tales como: la modelación de diferentes escenarios y la simulación de imágenes alternativas de futuro. Dichos modelos ofrecen la posibilidad de integrar un conjunto de factores, no solo económicos, sino también ambientales, sociales y otros, abarcando así los aspectos mas representativos de las dinámicas territoriales. Partiendo de esto sería posible abarcar diferentes alternativas de desarrollo urbano futuro que involucren los intereses de los diversos agentes y partes implicados en los procesos de planificación del territorio, por mencionar algunos: ambientalistas, economistas, agentes inmobiliarios, políticos, investigadores, agentes sociales, entre otros.

Así, la simulación de dichas imágenes alternativas podría utilizarse como una herramienta para visualizar y evaluar los efectos que puede ocasionar la utilización de unos u otros criterios en la planificación urbana. Además esto coadyuvaría a la

implementación de herramientas novedosas en los procesos de toma de decisión espacial, los cuales se presentan como los grandes ausentes en gran parte de los procesos de planificación en el ámbito español.

En este sentido, la región de Madrid no es ajena a todos estos procesos y carencias. De hecho, esta urbe es considerada uno de los focos críticos de la Unión Europea en lo que a desarrollo urbano se refiere, debido, principalmente, a que en los últimos 10-15 años ha experimentado un rápido proceso de urbanización, transformando, sólo en la última década del siglo pasado, más de 50.000 has de su territorio en superficies artificiales, configurándose así un nuevo modelo territorial aquejado de serios problemas de sostenibilidad, dentro del contexto de un marco débil de planeamiento espacial. Además, como dato interesante, cabe destacar que el crecimiento de la población no justifica esta dinámica, pues en ese mismo período sólo aumentó en un 5,16%, revelándose una inexistente vinculación entre el crecimiento urbano y la necesidad de vivienda (López de Lucio, 2003; EEA, 2006; OSE, 2006; Delgado Jiménez, 2009).

Dichos procesos han provocado que la dinámica de la ocupación del suelo y el crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid haya sido objeto de estudio y análisis en varios momentos en los últimos años (Otero, 1993; Castro y García-Abad, 1993; Sancho Comíns *et al.*, 1993; Zarate *et al.*, 1998; Aldana, 2005; OSE, 2006).

Dentro de los datos más relevantes aportados por dichas investigaciones están los siguientes: las superficies artificiales se incrementaron en más de un 50% entre 1990 y 2000; aumentó la red de carreteras ocasionando la fragmentación del paisaje, pérdida de tierras agrícolas y algunos usos forestales; aumento de zonas comerciales e industriales asociado a nuevos desarrollos urbanísticos de estructura urbana laxa¹; abandono de tierras de cultivo frente a expectativas urbanísticas; entre otros.

Cabe señalar que si bien estos estudios han sido realizados con rigor científico, en algunos, la fuente cartográfica utilizada no cumple con todos los parámetros de calidad requeridos en este tipo de estudios multitemporales (escala, nomenclatura, resolución, etc.), lo que puede repercutir en la ineficaz cuantificación de los cambios de usos del

¹ En esta categoría se incluyen las edificaciones abiertas con o sin espacios verdes asociados, tales como: calles arboladas o pequeños parques y/o jardines. Son estructuras urbanas adosadas al núcleo mas compacto de la ciudad.

suelo. Asimismo, hoy en día existen metodologías más modernas y mejores que las empleadas en dichos trabajos.

Por otro lado, el crecimiento de las nuevas zonas urbanas se da como resultado de la interacción de una serie de factores socioeconómicos, demográficos, ambientales, políticos, de accesibilidad, de planificación, entre otros. Por tanto, es importante, además de determinar los cambios, explorar sobre cuales fueron las lógicas o los factores que influyeron en que dichos cambios ocurrieran. En estos casos, es muy habitual que la explicación del crecimiento urbano se haga de manera cualitativa, haciendo deducciones sobre los cambios y su relación con algunas fuerzas conductoras que afectan directamente la utilización del suelo, y no aplicando técnicas estadísticas para relacionar de forma cuantitativa el cambio de algún uso del suelo con un conjunto de factores espaciales. Esto es debido a que el conjunto de factores que inducen el crecimiento urbano en muchos casos son poco asequibles, más aun, cuando el análisis se realiza de manera espacial, incluso se puede asegurar que algunos factores son imposibles de estimarse a nivel territorial, por ejemplo: la especulación del suelo o de la vivienda. Asimismo, algunos factores, que habitualmente eran los principales inductores de las dinámicas urbanas han sido desestimados, dando paso a otras fuerzas conductoras. Por ejemplo, el aumento de la población, que históricamente era el principal motor del crecimiento de las ciudades, hoy en día, en lugares donde hay poca o ninguna presión demográfica siguen proliferando nuevos asentamientos urbanos, inducidos, sin duda, por otro tipo de factores, como podrían ser: económicos, de accesibilidad, etc. (EEA, 2006).

En el caso de Madrid, estudios recientes han mostrado algunos aspectos clave en el desarrollo y configuración espacial de la región, tales como las nuevas carreteras orbitales construidas en el área metropolitana de Madrid (Serrano Cambronero *et al.*, 2002); la evolución experimentada por diferentes variables como el crecimiento del número de kilómetros de carretera; los movimientos realizados en la red de cercanías y de metro; el aumento de la demanda de agua y del número de depuradoras; el crecimiento de suelo urbanizable (López de Lucio, 2003 y 2004); la evolución y descentralización de distintos sectores, los cuales han incidido en la configuración espacial actual de la región (Santiago Rodríguez, 2007; García Palomares y Gutiérrez Puebla, 2007), etc.

Sin embargo, y como hemos venido mencionando, dichos estudios se basan en análisis cualitativos sobre la evolución de ciertos factores que afectan de manera implícita la dinámica del territorio, pero no hacen un análisis cuantitativo en el cual se integren factores económicos, biofísicos, sociales, de planificación, de accesibilidad, etc., para determinar las lógicas que guiaron el crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid.

De este modo, se observa como la región de Madrid posee una compleja y desbordante dinámica urbana, con un Plan Regional de Estrategia Territorial que, por un lado, ha encontrado muchas dificultades para formular y tramitar instrumentos de ordenación territorial y, que por otro, presenta una propuesta completamente desvinculada de los problemas inmediatos del modelo territorial. Al respecto, se puede decir que los modelos de simulación se presentan como un instrumento innovador, en los cuales es posible considerar las dinámicas actuales de la región y, a la vez, incluir la opinión consensuada de expertos, instituciones, ambientalistas, constructores, sociedad, entre otros, permitiendo de este modo llevar a cabo un proceso de planificación del territorio más informado.

Actualmente, en la simulación escenarios de futuro es posible incorporar un conjunto de criterios económicos, ambientales y sociales, y con ellos se pueden generar un amplio número de imágenes futuras del territorio. Dentro de dichas imágenes se pueden abarcar simulaciones de tendencia (simular lo ocurrido en el pasado), simulaciones bajo criterios económicos (crisis, desarrollo económico acelerado), simulaciones bajo la consideración de los tres pilares básicos del desarrollo sostenible (alcanzar un equilibrio a largo plazo entre el desarrollo económico, la protección del medio ambiente, el uso eficiente de los recursos y la equidad social), entre otras.

Para este fin, se han desarrollado un sin número de modelos aplicados en diferentes áreas de estudio y utilizando diferentes técnicas, tales como: Modelos de Autómatas Celulares (AC), Modelo de Regresión Espacial (RE), Técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), Redes Neuronales (RN) y Modelos Basados en Agentes (MBA), entre otros.

En el caso del área de estudio que nos concierne, dos han sido los ejercicios de simulación de escenarios realizados en los últimos años (Barredo Cano y Gómez Delgado, 2008; Hernández Jiménez y Winder, 2006). En ambos se utilizan modelos

basados en AC, los cuales han aportado nuevas posibilidades para evaluar los impactos y necesidades derivados del crecimiento de suelo urbano (necesidades de transporte, exposición a riesgos naturales, impacto del cambio climático), así como para la evaluación de la sostenibilidad ambiental del territorio. Sin duda, estos escenarios pueden ser de gran utilidad para los planificadores del territorio y para los agentes involucrados en la toma de decisiones. No obstante, en los modelos de AC, usualmente, no se integran los factores suficientes para poder asignar un determinado uso del suelo en el lugar más adecuado desde el punto de vista de la capacidad de acogida del territorio.

Al respecto, podemos decir que las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) han demostrado sobradamente su eficiencia a la hora de diseñar modelos “óptimos” territoriales, ya que consideran la adecuación y aptitud que presenta el territorio para que sobre él se desarrolle una determinada actividad (residencial, industrial, comercial, etc.). Pese a esto, no han sido utilizadas como tales en la simulación de diferentes escenarios de futuros desarrollos urbanos, por lo que su aplicación en este campo merece ser estudiado.

Si bien estas técnicas han sido duramente criticadas por tener un alto grado de subjetividad, no hay que olvidar que recientemente se han venido impulsando procesos de planificación participativa, en los cuales inevitablemente se deben integrar una mezcla de información objetiva (estimaciones cuantitativas, encuestas, etc.) y subjetiva (opiniones, preferencias, juicios, etc.). Aún así, cuando se desarrollan modelos de simulación aplicando técnicas de EMC, generalmente se hace un gran esfuerzo por introducir tanta objetividad como sea posible en un proceso que es altamente subjetivo (Lamelas Gracia, 2009).

Otro aspecto que es necesario considerar en la simulación de escenarios de futuro es que ésta se hace en un intervalo de tiempo, a mediano o largo plazo. Es decir, se parte de la situación de ocupación del suelo actual y, utilizando una serie de factores ponderados según el planteamiento conceptual del modelo desarrollado y los objetivos que se desean alcanzar, se simulan diferentes escenarios a un horizonte futuro. Por lo cual, el resultado de estas simulaciones de futuro deben ser tratado con mucha cautela, ya que no es posible determinar el grado de confiabilidad de algo que no se ha producido todavía (Barredo Cano y Gómez Delgado, 2008).

Una alternativa para dar credibilidad a este tipo de modelos es el análisis de sensibilidad (AS). Dicho análisis consiste, básicamente, en investigar si pequeñas variaciones en los parámetros de los modelos influyen significativamente en el resultado del mismo.

Dicha técnica se ha venido aplicando en modelos espaciales y no espaciales, por un lado, utilizando métodos numéricos o estadísticos, y por otro, implícitamente en Sistemas de Información Geográfica (SIG), y más en particular en conjunción con las técnicas de EMC. No obstante, se ha detectado que los procedimientos numéricos o estadístico de AS se hacen más complejos, o intratables, cuando se consideran como insumos de entrada variables espaciales o temporales. Aun así, estos métodos han sido utilizados de forma más o menos satisfactoria para la simulación de modelos espaciales, aunque su aplicación es limitada, pues en estos no se contempla la variabilidad espacial de las variables y parámetros incluidos en el modelo. Lo anterior se debe, entre otras cosas, a que el AS no se realiza directamente con las variables espaciales de los modelos, sino representando dichas variables a través de una función de distribución de probabilidad. Otro aspecto que no se considera en este tipo de AS es la demanda de superficie requerida en las simulaciones de futuro.

Ahora bien los AS aplicados implícitamente a modelos espaciales ejecutados en SIG son muy escasos y limitados, tal y como ponen de manifiesto las revisiones bibliográficas llevadas a cabo por Qureshi et al., (1999) y Gómez Delgado y Bosque Sendra (2004). En algunos trabajos es común que se aplique un proceso de simulación del tipo *What if*, es decir, se examina el efecto que un pequeño cambio en los parámetros del modelo tiene en los resultados del mismo. En estos casos, básicamente se realizan cambios en el orden de preferencias asignados a cada criterio u objetivo, variaciones en los valores dados a los parámetros de los modelos (pesos, métrica de distancia, etc.), o se aplican diferentes métodos de agregación para convertir los mapas de aptitud (píxel) en mapas de zonificación ambiental (grupo de píxeles), entre otros.

Ante esto, resulta evidente la importancia que tiene desarrollar nuevas metodologías de AS explícitamente espaciales en SIG, y que las variaciones en el modelo se realicen en cada punto del territorio, tanto en las variables o factores de entrada como en los parámetros de los modelos. Con esto sería posible establecer la influencia de las variables en los resultados del modelo de forma cartográfica.

1.2. Objetivos e Hipótesis

El **objetivo principal** de este trabajo es: *describir, analizar y simular las dinámicas urbanas pasadas y posibles dinámicas futuras de la Comunidad de Madrid, utilizando para ello técnicas de análisis estadístico, Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica.*

Dicho objetivo permitirá realizar una mejor planificación del territorio madrileño, y bajo éste formular la **hipótesis de partida**: *las Tecnologías de la Información Geográfica, técnicas estadísticas y Evaluación Multicriterio permitirán describir y analizar el crecimiento urbano, así como generar diferentes alternativas de futuro, mismas que al ser evaluadas, revelaran el impacto que cada una de éstas ocasionaría en los usos de suelo.* Estas imágenes futuras servirán para iniciar un debate entre los diferentes grupos implicados en la planificación del territorio y/o en la toma de decisiones, sobre cual sería la mejor alternativa de futuro para la región de Madrid.

Con la finalidad de alcanzar el objetivo principal y contrastar la hipótesis partida se plantea una serie de **objetivos particulares**:

- I. Realizar un análisis detallado de los cambios en la ocupación del suelo, en particular, del crecimiento de suelo urbano en la Comunidad de Madrid entre 1990 y 2000.
- II. Determinar de forma cuantitativa la relación entre distintos factores y la localización de las nuevas superficies artificiales entre 1990 y 2000 en la Comunidad de Madrid, a través de la utilización de diferentes técnicas de Regresión (Lineal Múltiple, Mínimos Cuadrados Parciales, Logística Espacial y Multinivel) que permitan realizar el análisis utilizando diferentes unidades espaciales de observación (municipio y píxel).
- III. Elaborar modelos de simulación del crecimiento urbano para la Comunidad de Madrid, explorando y profundizando en la aplicación de técnicas de Evaluación Multicriterio para la simulación de diferentes escenarios (Tendencia, de Crisis y de Sostenibilidad u óptimo).
- IV. Desarrollar una metodología, fácil e intuitiva, de AS explícitamente espacial, utilizando las herramientas disponibles en un entorno SIG raster.

1.3. Estructura de la tesis

La tesis se compone de siete capítulos: uno de introducción, otros cinco capítulos que recogen la investigación realizada en la tesis (cada uno se corresponden con una publicación) y otro de conclusiones generales. Además, se agregan 5 anexos que vienen a complementar y reforzar los análisis realizados en cada apartado y que han sido presentados como comunicaciones en distintos congresos (Tabla 1).

Es necesario señalar que, si bien en la estructura de la tesis (Figura 1) no se observan los apartados clásicos de un proceso de investigación (antecedentes, marco teórico y geográfico, metodologías, etc.), se debe a que ésta se presenta como un conjunto de artículos científicos y, por tanto, cada capítulo lleva implícito las etapas de investigación mencionadas.

En el **Primer capítulo** se hace una introducción de la tesis y se plantean los objetivos y la hipótesis de la investigación. En el **Segundo capítulo** se realiza un análisis y descripción de los cambios de usos del suelo y del crecimiento urbano ocurridos en el período de 1990 al 2000. En dicho análisis se aplica la metodología desarrollada por Pontius *et al.*, (2004), la cual permitió hacer un análisis exhaustivo de los cambios de uso del suelo, así como determinar los cambios más significativos, siendo en general usos correspondientes a las superficies artificiales (estructura urbana laxa, urbanizaciones exentas y/o ajardinadas², zonas industriales y comerciales³ y zonas en construcción⁴).

En el **Tercer capítulo** se trata de identificar los factores (socioeconómicos, biofísicos, de accesibilidad...) que pueden estar relacionados con el crecimiento de dichas categorías urbanas. Para ello se exploró un número importante de técnicas estadísticas como la regresión lineal múltiple, la regresión por mínimos cuadrados parciales, la regresión logística y la regresión multinivel, utilizando para este fin dos unidades de observación (municipio y píxel).

² En esta categoría se incluyen las zonas de primera o segunda residencia, fuera de los núcleos urbanos y que disponen de espacios verdes.

³ En esta categoría se incluyen las zonas definidas como polígonos industriales cuya actividad es mayoritariamente industrial y las grandes zonas comerciales como hipermercados y zonas asociadas o grandes centros comerciales a las afueras de las ciudades.

⁴ En esta categoría se incluyen los espacios en construcción, excavaciones de suelo o roca firme, movimientos de tierra.

Una vez estudiadas las dinámicas del crecimiento urbano, se plantea el **Cuarto capítulo**, en el que se desarrolla un modelo de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. En este modelo normativo se realiza una asignación óptima de zonas residenciales, comerciales e industriales para el año 2000, partiendo de los datos de ocupación del suelo reales en el año 1990. A partir de este modelo se hizo una valoración entre el crecimiento real ocurrido y lo que hubiese sido un crecimiento urbano deseable para el año 2000. Partiendo de estas premisas, posteriormente se formuló un modelo deseable para el año 2020, por un lado partiendo de la situación real en el año 2000 y, por otro, partiendo de la situación deseable obtenida con los datos reales de 1990.

Percibiendo la amplia gama de ventajas que provee la simulación de modelos de crecimiento urbano de futuro en conjunción con las técnicas de evaluación multicriterio, el **Quinto capítulo** se dedica a la simulación de tres alternativas diferentes de crecimiento urbano para el año 2020. Primero se presenta un escenario que reproduce las tendencias ocurridas en el pasado, el segundo escenario representa un modelo de desarrollo en un periodo dilatado de crisis económica y el tercero incorpora los principios básicos del desarrollo sostenible. Así, se obtuvieron tres imágenes de desarrollo urbano futuro desde tres puntos de vista diferentes, y se analizaron las consecuencias que cada uno de ellos podría tener en el comportamiento de las dinámicas territoriales.

Por otro lado, considerando el grado de subjetividad que pueden contener este tipo de modelo, se realizó un **Sexto capítulo** en el cual se desarrolla una propuesta de análisis de sensibilidad explícitamente espacial en un SIG raster, la cual se aplica a los modelos de asignación óptima desarrollados en los dos capítulos anteriores, con la finalidad de determinar el grado de confiabilidad de los resultados.

Por último, se presenta un **Séptimo capítulo** donde se recogen las principales conclusiones obtenidas en el desarrollo de la tesis, así como las líneas futuras de investigación.

A la par de estos capítulos, se presentan **5 anexos**. En los anexos 1, 2 y 3 se llevó a cabo el análisis de los factores explicativos del crecimiento urbano, pero, considerando

diferentes unidades de observación. En primer lugar se utilizaron los límites municipales (anexo 1), posteriormente, el análisis se realizó a nivel de píxel (anexo 2) y por último se consideró una zonificación territorial de la CM, en particular la que define las coronas metropolitanas (anexo 3). Dichos anexos complementan el trabajo hecho en el capítulo 3. Asimismo, los anexos 4 y 5 vienen a fortalecer el trabajo desarrollado en los capítulos 4 y 5. En dichos anexos, por un lado, se presenta el diseño y simulación de los escenarios de demanda de suelo para el año 2020 (anexo 4), y por otro, el desarrollo de una herramienta informática para la asignación/simulación de usos de suelo (anexo 5), ambos trabajos fueron esenciales para la simulación espacial de los patrones urbanos en los modelos y escenarios planteados.

Tabla 1. Difusión y publicación de los capítulos y anexos en congresos y revistas científicas

| Capítulo | Publicación | Estado |
|----------|--|---------------------|
| 2 | 1.- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2009). Análisis de los cambios del uso del suelo ocurridos en la Comunidad de Madrid en el periodo de 1987 a 2000, <i>Scripta Nova</i> , Vol. XIII, 293, España. | Publicado |
| 3 | 2.- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (En revisión). Spatial and statistical analysis of factors explaining urban growth in the community of Madrid, <i>The Annals of Regional Science</i> . | En revision |
| 4 | 3.- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2010). Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando métodos de evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica, <i>Geofocus</i> , 10, pp. 103-134. | Publicado |
| 5 | 4.- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (En revisión). Simulation of scenarios of future urban growth for the Community of Madrid using GIS and MCE. <i>Environment and Planning B. Planning and design</i> . | En revision |
| 6 | 5. Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. Propuesta de análisis de sensibilidad explícitamente espacial para un modelo de simulación de crecimiento urbano. Este trabajo se presentará en la <i>6th International Conference on Sensitivity Analysis of Model Output</i> (SAMO 2010, 19-22 de Julio). El resumen en extenso fue aceptado y se publicará en las actas del congreso “ <i>Procedia</i> of Elsevier”. Asimismo, después de la conferencia, los artículos completos serán considerados para su publicación en números especiales en <i>Reliability Engineering and System Safety</i> y en una edición temática en <i>Environmental Modelling and Software</i> . | Publicado (resumen) |

| Anexo | Publicación | Estado |
|-------|--|-------------|
| 1 | I.- Plata Rocha, W. , Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2008). Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos (RLM y PLS) y SIG. <i>XIII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica</i> , pp. 121-134, Las Palmas de Gran Canaria, España. | Publicado |
| 2 | II.- Plata Rocha, W. , Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2008). Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG. Presentado al <i>XIII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial</i> , La Habana, Cuba, y publicado en la <i>Revista de Planeamiento Territorial y Urbanismo Iberoamericana</i> , Num. 0, España. | Publicado |
| 3 | III.- Plata Rocha, W. , Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2009). Incidencia de la zonificación del territorio en los factores explicativos del crecimiento urbano de la Comunidad de Madrid. <i>XII Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica</i> , Heredia, Costa Rica, y seleccionado para ser publicado en la <i>Revista Geográfica de America Central</i> . | En revisión |
| 4 | IV.- Aguilera Benavente, F., Plata Rocha, W. , Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M. (2009). Hacia la simulación de escenarios futuros de demanda de ocupación de suelo en ámbitos metropolitanos. <i>II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad</i> , Barcelona, España, y seleccionado para ser publicado en la <i>Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo</i> , 4, pp. 57-80. | Publicado |
| 5 | V.- Rodríguez Álvarez, Y., Plata Rocha, W. , Salado García, M. J., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2009). Herramienta para la Asignación Óptima de Usos del Suelo. <i>II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad</i> , pp. 1-13, Barcelona, España. | Publicado |

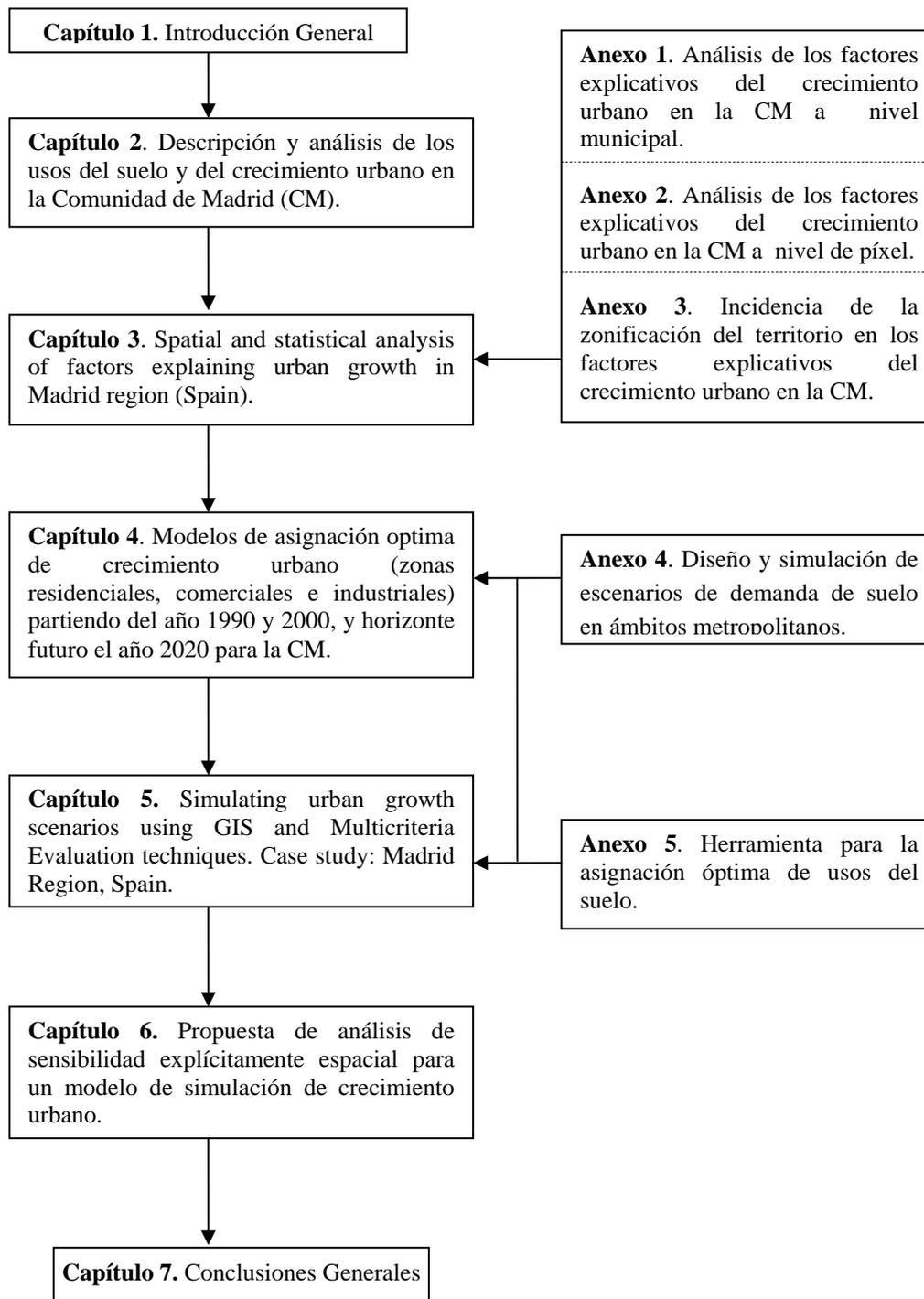


Figura 1. Estructura de la tesis

1.4. Bibliografía

Aldana, A. T. (2005). “Cartografía de los cambios en las cubiertas artificiales de la Comunidad de Madrid-España”, *Revista forestal latinoamericana*, 35, pp. 59-86.

Azcárate Luxán, M. V., Cocero Matesanz, D., Fernández Fernández, A., García Lázaro, F. J., Muguruza Cañas, C. y Santos Preciado, J. M. (2008). “Rasgos fundamentales del reciente proceso de urbanización difusa. Algunas reflexiones sobre la realidad de la ciudad dispersa en las aglomeraciones urbanas españolas”, *XI Coloquio Ibérico de Geografía, La perspectiva geográfica ante los nuevos retos de la sociedad y el medio ambiente en el contexto ibérico*, Alcalá de Henares, España.

Barredo Cano, J. I. y Gómez Delgado, M. (2008). “Towards a set of IPCC SRES urban land-use scenarios: modelling urban land-use in the Madrid región”, en Paegelow, M. y Camacho Olmedo, M. T. (Ed.): *Modelling Environmental Dynamics, Advances in Geomatic Solutions*, Springer, pp. 363- 385.

Castro, R. y García-Abad, J. (1993). “Confección de Cartografía Dinámica de Ocupación del Suelo con SIG: Municipio de Brea del Tajo (Comunidad Autónoma de Madrid)”, *2º Congreso de AESIG*, Madrid, pp. 375-392.

Delgado Jiménez, A. (2009). “Análisis de la evolución del modelo de ocupación del suelo de naturaleza urbana en las capitales españolas 2001-2007”, *II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad*, Terrassa, España.

EEA, European Environment Agency (2006). *Urban sprawl in Europe, the ignored challenge*. EEA Report No 10/2006.

García Palomares, J. C. y Gutiérrez Puebla, J. (2007): “La ciudad dispersa: cambios recientes en los espacios residenciales de la Comunidad de Madrid” *Anales de Geografía*, 27 (1), pp. 45-67.

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2004). “Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision-making: a review”, *Human and Ecological Risk Assessment*, 10, pp. 1173-1187.

Hernández Jiménez, V. and Winder, N. (2006). Running experiments with the Madrid Simulation Model, *Final Report of Time-Geographical approaches to Emergence and Sustainable Societies (TiGrESS)*.

Lamelas Gracia, M. T. (2009). “Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial”, *Geofocus*, 9, pp. 28-66.

López de Lucio, R (2003). “Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid”, *Urban*, 8, pp. 124-161.

López de Lucio, R. (2004). “Morfología y características de las nuevas periferias. Nueve paisajes residenciales en la región urbana de Madrid”, *Urban*, 9, pp. 56-80.

OSE, Observatorio de la Sostenibilidad en España (2006). *Cambios de ocupación del suelo en España. Implicaciones para la sostenibilidad*. Alcalá de Henares, España, OSE.

Otero, I. (1993). “Una aplicación del Pc ArcInfo al análisis del cambio paisajístico”. En: Asociación Española de Sistemas de Información Geográfica. 2º Congreso. *Los Sistemas de Información Geográfica en el umbral del siglo XXI*. Madrid. pp. 501-517.

Qureshi, M. E., Harrison, S. R., Wegener, M. K. (1999). “Validation of multicriterio analysis models”, *Agricultural Systems*, 62, pp. 105-116.

Sancho Comins, J., Bosque Sendra, J., y Moreno Sanz, F. (1993). “La Dinámica del Paisaje: aplicaciones de un SIG raster al ejemplo de Arganda del Rey en las Vegas de Madrid”, *Catastro*, 18, pp. 35-51.

Santiago Rodríguez, E. de (2007). “Madrid, ciudad única. Pautas y lógicas espaciales recientes en la región madrileña”, *Urban*, 12, pp. 8-33.

Serrano Cambroner, M., Gago García, C. y Antón Burgos, F. J. (2002). *Impacto territorial de las carreteras orbitales de la Comunidad de Madrid*. Madrid, Dirección General de Investigación, Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid.

Zárate, A., Ojeda, L., Rebollo, J., Pérez, M., y de Pablo, C. (1998). “Cambios en el Paisaje de la Comunidad de Madrid”, en Arias, A. y Fourneau, F. (eds.). *El paisaje mediterráneo*. Universidad de Granada – Junta de Andalucía, España, pp. 213-228.

Capítulo 2

Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000)

Publicación:

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2008). “Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000)”, *Scripta Nova* Vol. XIII, 293. <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-293.htm>

RESUMEN

Se analiza la dinámica de la ocupación del suelo en Madrid entre 1990 y 2000 usando los datos del CORINE. Para ello se lleva a cabo una tabulación cruzada de los dos mapas de ocupación del suelo y se determinan las ganancias, las pérdidas, los intercambios y el cambio neto y total de cada categoría de ocupación del suelo, a distintos niveles de desagregación de la leyenda de ocupaciones del suelo. Se observa un fuerte crecimiento de las zonas urbanas, un aumento algo menor de las ocupaciones forestales y una importante disminución de las áreas dedicadas a actividades agrarias.

Palabras clave: Dinámica de la ocupación del suelo, CORINE 1990 y 2000, Madrid.

ABSTRACT

We analyze the dynamics of land use in Madrid between 1990 and 2000 using data from CORINE. It carries out a cross tabulation of the two maps of land use and determining the total and net change, swap, as well as gross gains and gross losses for each category of land use, at different levels of disaggregation of the land use legend. There is a strong growth in urban areas, a less growth of forest and a significant decrease in the areas involved in agricultural activities.

Keywords: Dynamic of the land use, CORINE 1990 and 2000, Madrid

1. INTRODUCCIÓN

Madrid, España y, más en general, todo el planeta, está sufriendo una modificación notable de los usos y de las ocupaciones de suelo¹. Se trata de un fenómeno importante por muy diversas razones, desde los efectos sobre la sostenibilidad a las variaciones en la producción económica y en la calidad de vida de la población. En cualquier caso la descripción detallada de este proceso es un paso esencial para su entendimiento, su explicación, en base a muy diversos tipos de factores (Plata y otros, 2009) y a su control mediante alguna forma de Ordenación del territorio (Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005, cap. 4).

La expansión urbana es uno de los factores que ha influido de manera decisiva en los cambios de usos del suelo registrados en las últimas décadas en todo el mundo y también, podemos asegurar, en Madrid (OSE, 2006). Si bien las zonas urbanas ocupan hoy día tan sólo el 2 % de la superficie de la tierra, sus efectos en la alteración del medio son importantísimos a escala local, regional y global. Ante este panorama, la descripción y análisis de esos cambios y sus consecuencias son claves para proponer estrategias de desarrollo territorial orientadas a mantener y proteger el territorio, los distintos ecosistemas que sobre él se desarrollan, así como para preservar la calidad de vida de la población que sobre él habita.

En este marco, el objetivo de este artículo es realizar un análisis detallado de los cambios en la ocupación del suelo en la Comunidad de Madrid entre 1990 y 2000, como un primer paso para poder analizar la evolución reciente de las actividades humanas en este territorio y su posible sostenibilidad a largo plazo, así como la variación en la calidad de vida de la población madrileña.

Este texto se organiza de la siguiente manera. Después de una breve introducción en la que se repasa la literatura más significativa sobre la metodología empleada para estudiar la dinámica de usos del suelo en general, y de Madrid en particular, se realiza, en un segundo apartado, una valoración sobre la adecuación de los datos disponibles para realizar un estudio de este tipo en esta región, llegando a la conclusión de la gran

¹ Este artículo se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación "Crecimiento urbano y sostenibilidad en la Comunidad de Madrid. Una aproximación a los factores explicativos de los cambios recientes de usos del suelo" (Ref: CCG06-UAH/HUM-0670), financiado por la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid (Dirección General de Universidades e Investigación) y la Universidad de Alcalá.

utilidad de la base de datos europea CORINE Land Cover (CLC). El tercer apartado describe la metodología empleada en este trabajo para determinar la dinámica de la ocupación del suelo entre 1990 y 2000 (Pontius y otros, 2004). El cuarto es el apartado central y más importante del texto, en él se determinan los cambios ocurridos entre esas fechas en la ocupación del suelo en Madrid, abordando el estudio con diferentes niveles de detalle, lo que permite desvelar importantes aspectos de esta dinámica que de otra manera no serían tan evidentes. Finalmente, el último apartado recoge las conclusiones más significativas que se pueden extraer de este análisis.

El estudio de la ocupación del suelo y sus cambios ha recibido mucha atención en los últimos años. Un buen resumen de muchas de las contribuciones al análisis general de los cambios en el uso de la tierra se reúnen en el trabajo de Helen Briassoulis (1999) donde se desglosan un conjunto de aspectos teórico-metodológicos y modelos desarrollados con fines descriptivos, explicativos, predictivos, prescriptivos y valorativos. Asimismo se pueden encontrar revisiones y resúmenes de los estudios dedicados a esta cuestión en numerosos libros. Ph. Mayaux y otros (2008), detallan el importante papel de la Teledetección y los satélites de observación de la Tierra en la obtención y clasificación de los datos que permiten determinar la dinámica de la ocupación del suelo en las diferentes regiones del mundo. De especial interés y relevancia es el programa de investigación LUCC de la Unión mundial de sociedades científicas, que ha supuesto un gran impulso en el desarrollo de este tipo de estudios y cuyos principales resultados se pueden observar en E. Lambin y Geist (2006), publicación final que cierra las tareas de este proyecto, aunque se pueden encontrar otras publicaciones anteriores con resultados preliminares interesantes (Gutman y otros, 2004).

Como ya se ha indicado, el crecimiento de las zonas urbanas es uno de los ejemplos más importantes de cambio de ocupación del suelo en todo el mundo. Sin embargo, no existen muchos ejemplos de su análisis utilizando los datos y los procedimientos similares a los empleados en este trabajo, quizás una de las publicaciones más significativa en este sentido sea la realizada por el OSE (2006) para el conjunto de nuestro país y donde el análisis del crecimiento urbano ha ocupado un espacio muy significativo, la finalidad de nuestro artículo es detallar aún más la descripción de las formas del crecimiento urbano en Madrid. Otros ejemplos de análisis que se pueden

mencionar son el proyecto Gigalopolis del NCGIA (<http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/>, consultado en febrero de 2009) centrado más bien en la simulación de los cambios de la ocupación urbana del suelo en el futuro; es de interés igualmente el trabajo de Chetan Agarwal y otros (2000), donde se hace un interesante repaso de las posibilidades de análisis de los cambios de la ocupación del suelo y de los modelos de simulación existentes sobre la cuestión.

Por su parte, la dinámica de la ocupación del suelo en la Comunidad de Madrid ha sido objeto de estudios y análisis en varios momentos en los últimos años. En primer lugar, en el trabajo de Milagros Serrano y otros (2002) encontramos claves importantes para estudiar estos cambios, aunque la investigación se limita a realizar una descripción del tipo y magnitud de éstos en torno a las carreteras orbitales recientemente construidas en el área metropolitana de Madrid. Por su parte, los trabajos de Ramón López de Lucio (2003 y 2004) también aportan datos importantes sobre los cambios territoriales acontecidos en la Comunidad de Madrid entre 1991 y 2001, a partir de la evolución experimentada por diferentes variables como el crecimiento del número de kilómetros de carretera, los movimientos realizados en la red de cercanías y de metro, el aumento de la demanda de agua y del número de depuradoras, el crecimiento de suelo urbanizable, etc., para cada uno de los 11 ámbitos territoriales en los que se divide la región madrileña. Como apunta Ramón López de Lucio, la región urbana de Madrid se transforma a una velocidad notable, configurándose un nuevo modelo territorial aquejado de serios problemas de sostenibilidad que han de ser corregidos mediante políticas públicas que re-equilibren y re-direccionen las dinámicas en marcha (López de Lucio, 2003: 161, Leboreiro, 1999), para ello el conocimiento detallado de los cambios de ocupación del suelo resulta primordial. Más recientemente Eduardo de Santiago (2007 y 2008a) y Juan Carlos García y Javier Gutiérrez (2007) han analizado las diversas lógicas espaciales de la conversión de Madrid en una ciudad dispersa y difusa, aportando datos muy interesantes sobre la evolución de distintos sectores que han incidido de manera especial en la configuración espacial actual de la región. Igualmente Eduardo de Santiago (2008b) ha mostrado la importancia en la distribución espacial de las zonas logísticas en la Comunidad de Madrid y el uso del territorio que implican.

En segundo lugar, encontramos una serie de estudios que describen más en concreto la dinámica de la ocupación del suelo en el conjunto de la Comunidad y con bastante

detalle espacial. Así, los trabajos de Isabel Otero (1993), Angnes Aldana (2005), Antonio Zarate y otros (1998), resultan interesantes por aplicar a estos análisis técnicas de intersección de mapas en un SIG, que permiten observar con bastante detalle los cambios netos entre las distintas fechas, pero adolecen de algún problema importante: en algunos casos las fuentes de datos empleadas son desiguales, es decir los dos mapas de ocupación del suelo empleados no se han elaborado con las mismas leyendas y esto puede generar cambios ficticios y poco seguros; en otros casos, las fechas de sus análisis ya son un poco antiguas. Por otra parte, el Observatorio de la Sostenibilidad en España, OSE (2006) también ha realizado un importante trabajo de descripción de la dinámica de la ocupación del suelo en todo el territorio nacional a escala de Comunidad Autónoma. En este caso, aunque los problemas anteriores desaparecen (las dos fuentes empleadas son coherentes y las fechas analizadas son recientes), la metodología empleada por el OSE para analizar los cambios no es la más moderna disponible y algunos de los resultados encontrados en Madrid pueden resultar, por ello, discutibles y mejorables. En este artículo se pretende realizar una aportación en este sentido.

También queremos hacer mención de otros trabajos que, si bien son de ámbito más parcial y afectan solo a algunos municipios de Madrid, demuestran la preocupación y el interés que por estos temas se tiene en la región desde hace ya varias décadas: Roberto Castro y Javier García-Abad (1993) y José Sancho y otros (1993). Para terminar, aunque la explicación y el entendimiento de las causas de los cambios de la ocupación del suelo no son objeto de este trabajo, cabe mencionar que entre esto deben estar factores biofísicos, variables socioeconómicas, cuestiones de accesibilidad, Los tres podrían ser los principales factores conductores de los cambios en los usos del suelo. En los trabajos de: Hu y Lo, 2007; Verburg y otros, 2004a; Cheng y Masser, 2003; Yang y otros, 2007; Serra y otros, 2005; Bocco y otros, 2000; Conway, 2005; Hoshino, 2001; Pan y Bilsborrow, 2005; Overmars y Verburg, 2006, se pueden encontrar ejemplos diversos de este tipo de análisis. También parecen relevantes las cuestiones relativas a la reglamentación de los planes de ordenación urbana e incluso al color político de los ayuntamientos en los que ocurren los cambios de uso, todas estas cuestiones deben ser utilizadas en la formulación de modelos explicativos y predictivos de la dinámica de la ocupación del suelo (ver, para el caso de Madrid, Plata y otros, 2009).

2. LOS DATOS DE PARTIDA. LA NECESIDAD DE UTILIZAR FUENTES DE DATOS HOMOGÉNEAS Y COMPARABLES

Para el análisis de los cambios de coberturas y usos del suelo en la región de Madrid se ha utilizado la información derivada del proyecto CORINE Land Cover correspondiente a los años 1990 y 2000, única información disponible elaborada con criterios homogéneos para las dos fechas. Como es sabido el programa CORINE (*Coordination of Information of the Environment*) nace con el ánimo de recopilar de manera coordinada y homogénea información sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales en la Comunidad Europea.

Dicha iniciativa se materializa con la creación del CORINE Land Cover de 1990 (CLC1990), base de datos numérica, geográfica y multitemporal a escala 1:100.000 sobre la cobertura y/o uso del territorio en el ámbito europeo, para cuya elaboración todos los países de la Unión Europea siguieron unas directrices comunes en cuanto a determinados aspectos técnicos (escala, resolución, nomenclatura), utilizando como fuente de información imágenes Landsat-4/5 TM.

Diez años después se lleva a cabo una actualización de dicha base de datos en prácticamente los mismos términos técnicos, de modo que la información fuese comparable para las dos fechas. Así, y a partir de la generación de un mosaico nacional y europeo utilizando imágenes de satélite Landsat-7 TM (producto IMAGE2000), se elabora un nuevo mapa de cobertura y uso del suelo (CLC2000), que permite detectar e interpretar los cambios ocurridos entre las dos fechas.

Para el proyecto CLC2000, las necesidades de actualización y mejora se concentraron, entre otros aspectos, en una nomenclatura más detallada. Así, las 64 clases utilizadas al nivel 5 para el CLC1990 aumentaron a 85 para el CLC2000. Por otro lado, en el CLC1990 se había utilizado una unidad mínima superficial cartografiable de 25 ha, la misma que se mantiene en el CLC2000 para el caso de la clasificación de las zonas agrícolas, forestales y humedales, sin embargo para cartografiar las superficies artificiales y de agua ésta desciende hasta 5 ha.

Es necesario puntualizar que para el caso de España el proyecto CORINE Land Cover 1990 ya estableció una ampliación de su leyenda, con un cuarto y un quinto nivel y 64 clases en total. La nomenclatura utilizada en este trabajo está basada, por tanto, en la

clasificación del CORINE Land Cover para España. No obstante, y dadas las diferencias mencionadas en la categorización de los usos del suelo entre 1990 y 2000, fue necesario realizar una homogenización de la leyenda. Dicha homogenización se realizó tomando como base el nivel 4, puesto que la diferencia de hasta 21 clases entre las dos bases de datos a nivel 5 hacía imposible llevar a cabo un análisis comparativo. La leyenda resultante consta de un total de 42 clases para el nivel 4, 31 para el nivel 3, 13 para el nivel 2 y 5 para el nivel 1.

Finalmente es necesario mencionar que existen otras bases de datos disponibles para la Comunidad de Madrid sobre cobertura/usos del suelo, como la elaborada por el Departamento de Economía y Gestión de las explotaciones e industrias forestales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid en el año 1997 (utilizando imágenes de satélite SPOT y fotografías aéreas escala 1:18.000 del año 1995, ver Consejería de Medio Ambiente, 1997). Sin embargo, está demostrado que el uso de bases de datos levantadas con criterios, leyendas y escalas distintas, para identificar e interpretar los cambios acontecidos entre distintas fechas ofrece resultados que no se ajustan a la realidad. De hecho, como ya hemos mencionado, existe un trabajo en el que se llevó a cabo un estudio de cambios de usos utilizando como fuente de información dicho mapa y el CLC1990 (Aldana, 2005). A pesar del esfuerzo realizado para homogeneizar las categorías de una y otra fuente, el estudio arrojaba que hasta un 47 % del territorio de la Comunidad había experimentado algún tipo de cambio entre las dos fechas, cuando del análisis realizado con el CLC1990 y el CLC2000 se deriva que más del 90 % de la superficie regional no ha experimentado ningún cambio en ese período.

Por lo tanto, los datos del proyecto CLC son, por su calidad y rigor científico, así como por el horizonte temporal que abarcan, los más adecuados para este estudio.

3. METODOLOGÍA

El análisis de los cambios de uso del suelo llevado a cabo en el presente trabajo se ha basado en la metodología desarrollada por Pontius y otros, (2004). Esta metodología permite obtener para cada categoría de uso del suelo las ganancias y las pérdidas, el cambio neto y los intercambios experimentados entre dos momentos temporales. Asimismo, permite valorar el cambio total tomando como referencia las persistencias y

así poder evaluar cuales fueron las transiciones sistemáticas más significativas entre categorías. Además permitió verificar el cambio real en el paisaje de la Comunidad de Madrid a través del análisis de los cambios de usos del suelo en los diferentes niveles de clasificación del Corine Land Cover.

Para ello, se parte de una matriz de tabulación cruzada (que en el estudio de usos de suelo comúnmente se denomina matriz de cambios) resultado de cruzar dos mapas de diferente fecha (1990 y 2000). En dicha matriz (Tabla 1) las filas representan las categorías del mapa en el tiempo 1 (T_1) y las columnas las categorías del mapa en el tiempo 2 (T_2). Asimismo, la diagonal principal muestra las persistencias entre el T_1 y T_2 , mientras que los elementos fuera de la diagonal principal dan cuenta de las transiciones ocurridas entre el T_1 y T_2 para cada categoría. En la fila 6 se recoge el total ocupado por cada categoría en el T_2 (P_{+j}), mientras que en la columna 6 se recoge el total de cada categoría en el tiempo T_1 (P_{i+}). Hasta aquí no hay ninguna diferencia con un análisis basado en un proceso de tabulación cruzada. Sin embargo, ante la necesidad de realizar un estudio detallado de los cambios, se agregaron una fila y una columna adicional. Así, la fila 7 mostraría la ganancia que tuvo cada categoría entre el T_1 y T_2 y la columna 7 la pérdida que tuvo cada categoría entre el T_1 y T_2 .

Tabla 1. Matriz de tabulación cruzada para dos mapas de diferente fecha

| | | Tiempo 2 | | | | | | |
|----------|---|------------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|------------|-------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Tiempo 1 | 1 | | Clase 1 | Clase 2 | | Clase n | Suma T_1 | Perdidas |
| | 2 | Clase 1 | P_{11} | P_{12} | | P_{1n} | P_{1+} | $P_{1+} - P_{jj}$ |
| | 3 | Clase 2 | P_{21} | P_{22} | | P_{2n} | P_{2+} | $P_{2+} - P_{jj}$ |
| | 4 | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| | 5 | Clase n | P_{n1} | P_{n2} | | P_{nn} | P_{n+} | $P_{n+} - P_{jj}$ |
| | 6 | Suma T_2 | P_{+1} | P_{+2} | | P_{+n} | P | |
| | 7 | Ganancias | $P_{+1} - P_{jj}$ | $P_{+2} - P_{jj}$ | | $P_{+n} - P_{jj}$ | | |

Fuente. Pontius y otros, 2004.

Una vez obtenida la matriz de tabulación cruzada, es posible calcular una serie de parámetros de gran importancia en el análisis de los cambios de usos del suelo:

Las ganancias, expresadas como la diferencia de la suma total de la fila 6 y los valores de la diagonal principal, es decir $G_{ij} = P_{+j} - P_{jj}$;

Las pérdidas, expresadas como la diferencia de la suma total de la columna 6 y los valores de la diagonal principal, es decir $L_{ij} = P_{j+} - P_{jj}$. Con estos valores se calcularon posteriormente el cambio neto, cambio total y los intercambios;

El cambio neto, expresado como el valor absoluto de la diferencia de las pérdidas y las ganancias de cada categoría $D_j = |L_{ij} - G_{ij}|$;

El intercambio, expresado como el doble del valor mínimo de las ganancias o las pérdidas, es decir $S_j = 2 \times \text{MIN}(P_{j+} - P_{jj}, P_{+j} - P_{jj})$;

El cambio total, sería el resultado de la suma de las ganancias y las pérdidas, es decir $DT_j = G_{ij} + L_{ij}$.

Posteriormente, los valores reales del cambio entre las fechas 1990 y 2000 se obtuvieron por medio de la ecuación del cambio total, que a diferencia de la del cambio neto permitió estimar la totalidad de las transiciones que se dieron entre categorías. Al respecto, cabe señalar que si una categoría hubiera presentado ganancias y pérdidas de la misma magnitud, el cambio neto sería igual a cero. Sin embargo, mediante la ecuación del cambio total, dicho resultado sería igual al doble de la pérdida o la ganancia (Figura 1).

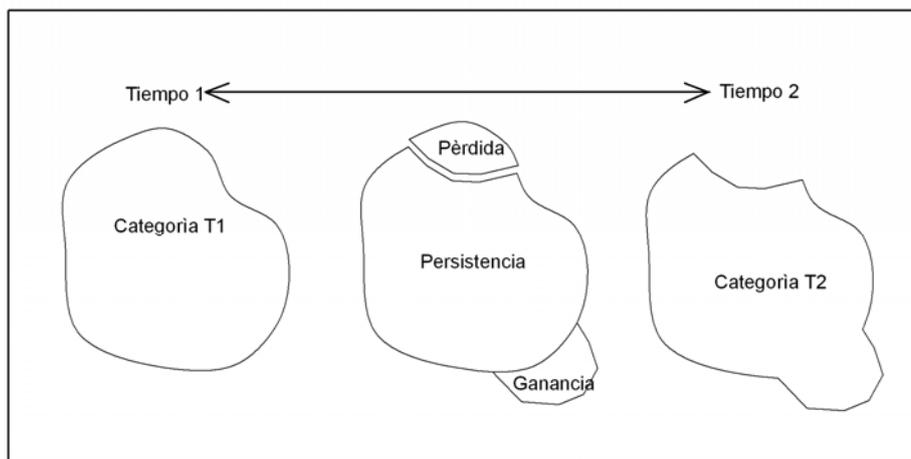


Figura 1. Categoría con superficie inicial y final igual.

Fuente. Elaboración propia.

Asimismo, al realizar el análisis de los cambios de uso del suelo en los diferentes niveles de la clasificación jerárquica del Corine (nivel 1, 2, y 4) fue posible identificar las transiciones que existen dentro de las categorías englobadas en los niveles más generales. Esto puede conllevar que aumente el total de ganancias, pérdidas, intercambios y cambio total conforme se desciende en el nivel de análisis, pues en el interior de las categorías más generales se producen intercambios importantes entre distintos usos del suelo, cambios que no son detectables al trabajar a un nivel general por englobarse en un mismo tipo. En la figura 2 aparece representado de manera gráfica el aumento experimentado por los distintos indicadores de cambio a medida que aumentaba el detalle de la clasificación de los usos del suelo en la Comunidad de Madrid. Como podemos observar, si el análisis de cambios se realizara tan sólo teniendo en cuenta el cambio neto (el indicador habitualmente utilizado en este tipo de estudios), podríamos deducir que no se producen diferencias significativas si cambiamos de nivel de detalle, cuando la realidad es bien distinta, según nos indica el resto de parámetros.

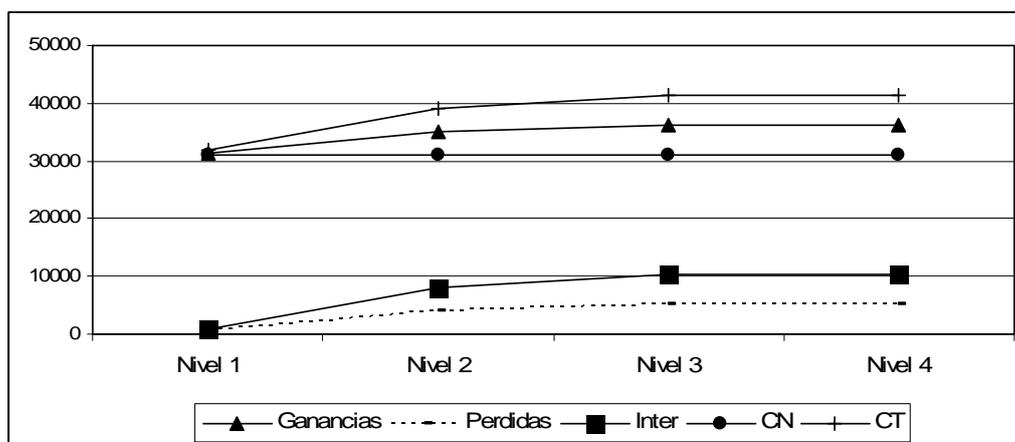


Figura 2. Aumento en los valores de cambio para las superficies artificiales.
Fuente. Elaboración propia.

Por último y con la finalidad de dar más fiabilidad a los resultados del análisis de los cambios, se verificó si las ganancias y las pérdidas obtenidas fueron significativas. Esto es posible llevarlo a cabo a través de la matriz de transiciones sistemáticas (Pontius y otros, 2004). Se dice que una transición es sistemática si la transición observada difiere de la transición esperada debido a un proceso aleatorio. Si una categoría no tiene tendencia particular de ganar o perder de cualquiera de las otras categorías, entonces la transición observada correspondería a los patrones esperados debido a procesos aleatorios (Alo y Pontius, 2007).

Esta matriz se calcula distribuyendo las ganancias y las pérdidas a través de las otras categorías según la proporción relativa de cada categoría en el T_1 y T_2 respectivamente. Asimismo, para identificar si los valores de la matriz de transiciones sistemáticas son significativos, se considera la tasa de crecimiento, obtenida como una función de la diferencia entre los valores observados (matriz de cambios) y los valores esperados (matriz de transiciones sistemáticas).

$$Ts_{ij} = (P_{+j} - P_{jj}) \left(\frac{P_{i+}}{P - P_{j+}} \right)$$

Finalmente, debe señalarse que fue posible aplicar esta metodología de manera sencilla a partir del módulo *Land Change Modeler for Ecological Sustainability* implementado en el *SIG Idrisi Andes*. Este módulo incluye un conjunto de herramientas para la rápida evaluación de cambios en forma gráfica y de mapas, proporcionando las ganancias y pérdidas, cambio neto, persistencia y transiciones específicas.

4. ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS DE USOS DE SUELO OBSERVADOS PARA LA COMUNIDAD DE MADRID ENTRE 1990 Y 2000

4.1. Descripción general a distintos niveles

Según se desprende de un análisis básico mediante tabulación cruzada de los datos del CLC a nivel 1 (Tabla 2), en el año 2000 una gran parte de la superficie de la región estaba destinada a un uso forestal y agrícola (49,23 % y 38,04 % respectivamente), mientras que el 11,93 % estaba ocupada por algún tipo de superficie artificial, siendo las superficies de agua muy poco representativas (0,80%). Si ponemos en relación estos datos con los registrados para el año 1990, tenemos que en un intervalo de algo más de 10 años la presencia de las dos primeras categorías mencionadas ha experimentado una ligera disminución (del 8,9 % de la existente en 1990 en las zonas agrícolas y del 0,4% en las forestales), mientras que las superficies artificiales han experimentado un incremento del 47 % respecto al suelo dedicado a este uso en 1990, y un incremento del 3,85 % respecto a la superficie total de la región. De hecho, a nivel nacional este incremento urbano ocupa el tercer puesto detrás de la Comunidad Valenciana (con un incremento del 52 %) y de la Comunidad Murciana (con un incremento del 62 %) (OSE, 2006). Finalmente, si bien los datos arrojan un ligero aumento de las superficies

de agua (7,4%), éste puede ser debido a la variación en la capacidad de los embalses entre unos años y otros (puesto que no se ha creado ninguna infraestructura nueva posterior a 1990) y a la aparición de nuevas láminas de agua producto de la intensa actividad de extracción de grava en determinadas áreas de la región como el tramo más meridional del río Jarama.

Tabla 2. Cambios en los principales usos del suelo en la Comunidad Madrid (1990-2000)

| CATEGORÍA | 1990 (datos de 1987) (ha) | 2000 (ha) | % sobre | | 2000-1987 (ha) | Incremento sobre 1987 (%) |
|--------------------------|---------------------------|------------|------------|--------------------|----------------|---------------------------|
| | | | total 1987 | % sobre total 2000 | | |
| Superficies artificiales | 64.821,00 | 95.755,25 | 8,08 | 11,93 | 30.934,25 | 47,7 |
| Zonas agrícolas | 335.229,75 | 305.306,50 | 41,77 | 38,04 | -29.923,25 | -8,9 |
| Zonas forestales | 396.515,00 | 395.065,00 | 49,41 | 49,23 | -1.450,00 | -0,4 |
| Zonas húmedas | 60,25 | 60,25 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,0 |
| Superficies de agua | 5.914,00 | 6.353,00 | 0,74 | 0,79 | 439,00 | 7,4 |

Analizando de manera más pormenorizada la matriz de cambios resultante de esta tabulación cruzada (Tabla 3), encontramos en primer lugar que, como es habitual en cualquier análisis de cambios de usos del suelo, domina la persistencia en el paisaje de la región (Pontius y otros, 2004; Burnicki y otros, 2007), pues según se desprende de los datos recogidos en la diagonal de la tabla, el 94 % de la zona de estudio no ha experimentado ningún cambio entre las dos fechas (de las un poco más de 800.000 ha que ocupa la Comunidad de Madrid, 756.017,75 continúan teniendo el mismo uso en el año 2000 y tan sólo 46.522,25 ha han experimentado algún tipo de cambio).

Tabla 3. Matriz de cambios de usos del suelo (CLC nivel 1) en la Comunidad Madrid (1990-2000). Medidos en Hectáreas

| | Sup. Artificiales | Zonas Agrícolas | Zonas Forestales | Zonas Húmedas | Sup. Agua | Total (1990) | Pérdidas |
|-----------------|-------------------|-----------------|------------------|---------------|-----------|--------------|-----------|
| S. Artificiales | 64.337,50 | 148,75 | 321,75 | 0 | 13,00 | 64.821,00 | 483,50 |
| Z. Agrícolas | 20.311,75 | 302.965,75 | 11.639,75 | 0 | 312,50 | 335.229,75 | 32.264,00 |
| Z. Forestales | 11.088,00 | 2.146,25 | 382.953,75 | 0 | 327,00 | 396.515,00 | 13.561,25 |
| Z. Húmedas | 0 | 0 | 0 | 60,25 | 0 | 60,25 | 0 |
| S. Agua | 18,00 | 45,75 | 149,75 | 0 | 5.700,50 | 5.914,00 | 213,50 |
| Total (2000) | 95.755,25 | 305.306,50 | 395.065,00 | 60,25 | 6.353,00 | 802.540,00 | 46.522,25 |
| Ganancias | 31.417,75 | 2.340,75 | 12.111,25 | 0 | 652,50 | 46.522,25 | |

Si atendemos a los cambios en términos de ganancias y pérdidas, son efectivamente las superficies artificiales las que mayor incremento han registrado, aglutinando el 67,5 % de las ganancias experimentadas por el conjunto de todas las categorías entre 1990 y 2000. Estarían seguidas, aunque bastante de lejos, por las zonas forestales. Las zonas

agrícolas también experimentan ciertas ganancias, aunque en general comprobamos que son las grandes perdedoras de la región.

Si analizamos a costa de qué otros usos se han producido las ganancias más importantes, comprobamos que las superficies artificiales han crecido, fundamentalmente, a base de terrenos agrícolas y forestales, aglutinando los primeros casi el 65 % de estas nuevas superficies (Tabla 3). En esta categoría no sería esperable que se produjera ninguna pérdida, pues es bastante poco usual que una superficie artificial cambie a otro tipo de uso más “natural”, sin embargo observamos que hasta casi 149 ha que en 1990 eran artificiales han pasado a ser zonas agrícolas en el 2000, 322 a zonas forestales y 13 a superficies de agua. Del mismo modo parece poco probable que casi 150 ha identificadas como cuerpos de agua en 1990 se hayan transformado en zonas forestales.

También podemos observar como, a pesar de que las zonas agrícolas y forestales han sufrido un retroceso entre las dos fechas, han experimentado intercambios positivos, básicamente entre ellas mismas. Así, hasta 2.146 ha de zonas forestales pasaron a ser zonas agrícolas en 2000. Por otro lado, un total de 11.640 ha de zonas agrícolas en 1990 han sido transformadas en zonas forestales en el 2000, lo que sin duda tiene unas connotaciones más positivas desde el punto de vista ambiental.

Por otro lado, un análisis más pormenorizado de los cambios experimentados en términos de cambios netos, cambios totales e intercambios (Tabla 4), arroja que las superficies artificiales y las zonas agrícolas registran el mayor volumen de cambios netos y totales, fundamentalmente debido a que dichos cambios se han experimentado en un solo sentido (ganancias en el primer caso y pérdidas en el segundo). Sin embargo, son las zonas forestales las que registran un intercambio mayor, pues han participado casi al 50 % tanto de pérdidas como de ganancias.

Precisamente en este caso se hace evidente la adecuación del estudio de los cambios en estos términos. Si calculamos el porcentaje que supone la superficie ocupada por zonas forestales en la Comunidad de Madrid en las dos fechas, obtenemos que prácticamente es la misma (49,4% en 1990 y 49,2% en 2000). Si no pudiésemos analizar con mayor profundidad los resultados podríamos haber concluido que prácticamente la superficie forestal no se ha modificado. Sin embargo, la realidad es muy diferente, ya que como

decimos se trata de la categoría que más intercambios ha registrado y que por tanto ha experimentado una transformación mayor (24.225,5 ha). En este caso tanto las ganancias como las pérdidas han sido considerables, lo que nos ofrece un panorama de cambios importante, aunque el valor de persistencia sea también elevado.

Tabla 4. Indicadores de cambios en la Comunidad de Madrid en el período 1990-2000 (CLC nivel 1)

| | Ganancias (ha) | Persistencias (ha) | Pérdidas (ha) | Cambio Neto (ha) | Cambio Total (ha) | Intercambio (ha) |
|-----------------|-------------------|-----------------------|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| S. Artificiales | 31.417,75 | 64.337,50 | 483,50 | 30.934 | 31.901 | 967,00 |
| Z. Agrícolas | 2.340,75 | 302.965,75 | 32.264,00 | 29.923 | 34.605 | 4.681,50 |
| Z. Forestales | 12.111,25 | 382.953,75 | 13.561,25 | 1.450 | 25.673 | 24.222,50 |
| Z. Húmedas | 0 | 60,25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sup. Agua | 652,50 | 5.700,50 | 213,50 | 439 | 866 | 427,00 |

Si atendemos a la distribución espacial de todos estos cambios, comprobamos como la mayor parte de la transformación de terrenos agrícolas a superficies artificiales se produce en las inmediaciones de zonas urbanas ya consolidadas y en las cercanías de las principales carreteras nacionales que emanan de Madrid (Figura 3). Destaca también el importante proceso de deforestación que se ha llevado a cabo en el Oeste de la región, especialmente en el recorrido de la N-VI. Por otro lado, si atendemos a los cambios registrados de agrícola a forestal, podemos deducir que se ha producido un importante abandono de la actividad agrícola y regeneración espontánea de la vegetación en toda la región.

Sin embargo, los resultados obtenidos a este nivel de detalle no resultan suficientes para sacar conclusiones relevantes sobre los cambios de usos del suelo experimentados en la región madrileña. En primer lugar la categoría superficies artificiales engloba toda una serie de usos que deberían ser estudiados de manera individual a la hora de analizar la dinámica de un determinado territorio, especialmente los relacionados con el proceso de urbanización. Por otro lado, la categoría de zonas forestales aglutina distintos usos con una importancia ambiental muy diferente. Esto por ejemplo nos podría llevar a sacar conclusiones erróneas sobre el proceso de deforestación mencionado entorno a la N-VI.

Así, se hace necesario descender a los siguientes niveles establecidos en el CLC para entender mejor la dinámica territorial de la región.

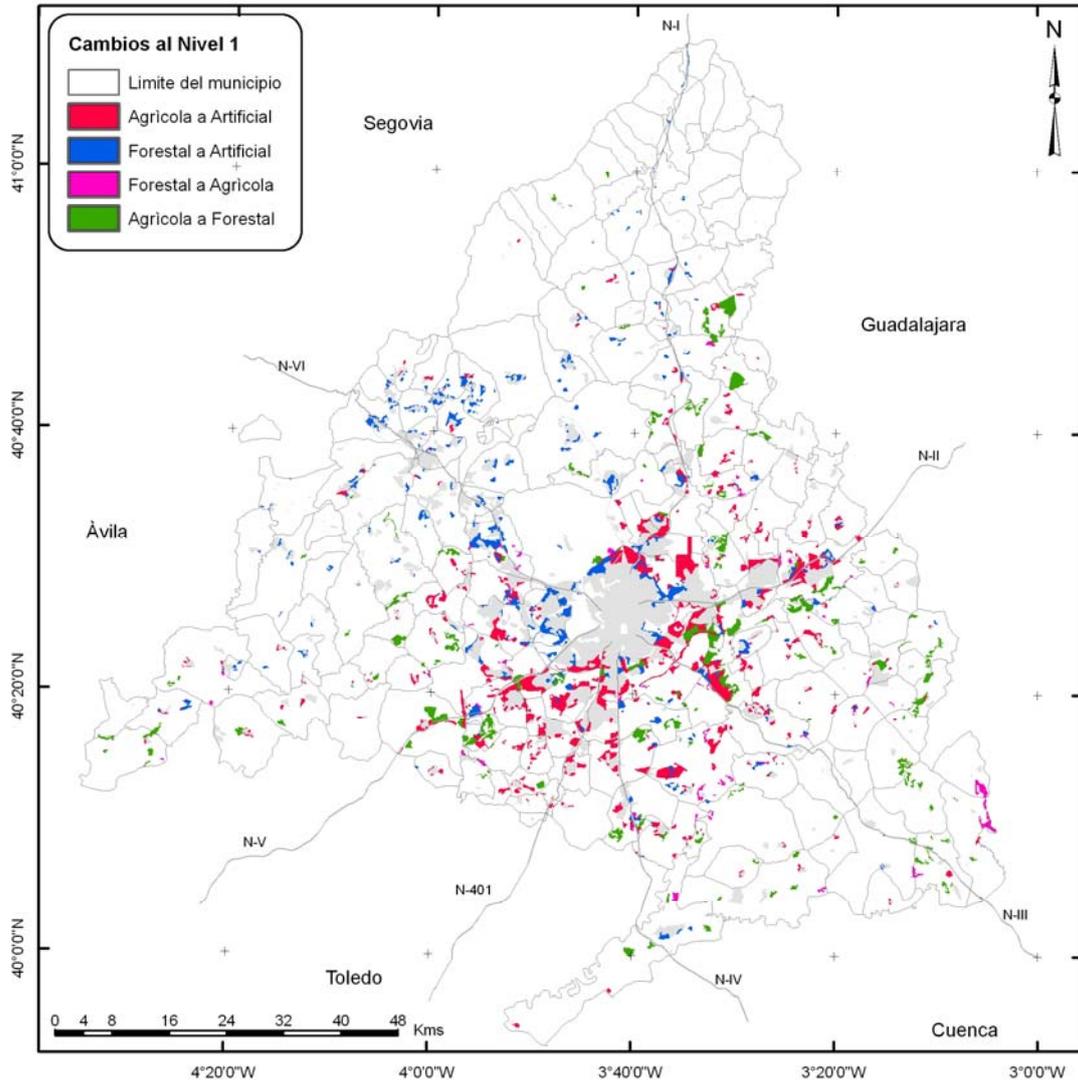


Figura 3. Cambios de uso del suelo en la Comunidad de Madrid (CLC nivel 1, 1990-2000).

Fuente. Elaboración propia a partir del CLC1990 y 2000. Instituto Geográfico Nacional, España

Como se puede observar de la tabla 5, las cinco grandes categorías del nivel 1 se desglosan en un total de 13 para el nivel 2. Aquí ya es posible diferenciar, por ejemplo, las zonas urbanas de los vertederos o zonas verdes y las zonas de bosque de las ocupadas por vegetación arbustiva o herbácea, distinción imprescindible para interpretar mejor los resultados obtenidos.

Lo primero que llama la atención si observamos los datos de la tabla 5, es el incremento, sustancial en algunos casos, del volumen de pérdidas y ganancias registrado si agrupamos las subcategorías del nivel 2 en las establecidas en el nivel 1. Como ya se ha explicado en el apartado de metodología, esto es debido a que se producen intercambios importantes entre distintos usos del suelo que a un nivel más general no eran detectables por encontrarse englobados bajo una misma tipología. Por lo tanto, lo

primero que comprobamos es que dentro de todos los grandes tipos de usos se producen intercambios internos muy importantes.

Tabla 5. Indicadores de cambios en la Comunidad de Madrid en el período 1990-2000 (CLC nivel 2)

| Categorías | Ganancias | Persistencias | Pérdidas | Cambio Neto | Cambio Total | Intercambio |
|--|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Zonas Urbanas | 14.602,00 | 41.525,25 | 276,50 | 14.325,50 | 14.879,00 | 553,00 |
| Zonas industriales, comerciales y de transporte | 8.986,00 | 13.908,25 | 151,50 | 8.834,50 | 9.137,50 | 303,00 |
| Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción | 9.073,25 | 1.563,50 | 3.373,75 | 5.699,50 | 12.447,00 | 6.747,50 |
| Zonas verdes artificiales, no agrícolas | 2.322,00 | 3.775,00 | 247,25 | 2.074,75 | 2.569,30 | 494,50 |
| TOTAL Superficies Artificiales | 34.983,25 | 60.772,00 | 4.049,00 | 30.934,25 | 39.032,25 | 8.098,00 |
| Tierras de labor | 1.822,50 | 193.348,00 | 29.869,75 | 28.047,25 | 31.692,00 | 3.645,00 |
| Cultivos permanentes | 103,00 | 20.072,00 | 1.037,75 | 934,75 | 1.140,80 | 206,00 |
| Praderas | 5,75 | 4.326,00 | 267,25 | 261,50 | 2.730 | 11,50 |
| Zonas agrícolas heterogéneas | 3.078,75 | 82.550,50 | 3.758,50 | 679,75 | 6.837,30 | 6.157,50 |
| TOTAL Zonas Agrícolas | 5.010,00 | 300.296,00 | 34.933,25 | 29.923,25 | 39.943,25 | 10.020 |
| Bosques | 2.324,75 | 78.442,75 | 1.659,75 | 665,00 | 3.984,50 | 3.319,50 |
| Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea | 13.687,00 | 295.265,75 | 15.592,50 | 1.905,50 | 29.280,00 | 27.374,00 |
| Espacios abiertos con poca o sin vegetación | 1.578,50 | 3.766,25 | 1.788,00 | 209,50 | 3.366,50 | 3.157,00 |
| TOTAL Zonas Forestales | 17.590,25 | 377.474,75 | 19.040,25 | 2.780 | 36.630,50 | 3.3850,50 |
| Zonas húmedas continentales | 0 | 60,25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Aguas continentales | 652,50 | 5.700,50 | 213,50 | 439,00 | 866,00 | 427,00 |

A este nivel de detalle ya es posible matizar que, de las superficies artificiales, son las zonas urbanas las que experimentan un mayor porcentaje de crecimiento entre las dos fechas, aglutinando el 41,7 % del incremento total. Sin embargo, si atendemos al conjunto total de las subcategorías encontramos que, detrás de las zonas urbanas, el uso que experimenta mayores ganancias sería los espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea, seguido, eso sí, de otras dos subcategorías de superficies artificiales, a saber, zonas de extracción minera, vertederos y de construcción y zonas industriales, comerciales y de transporte. Recordemos, en cualquier caso, que esta subcategoría

(vegetación arbustiva) pertenece a las zonas forestales, catalogadas como las segundas grandes ganadoras a nivel 1, y si observamos con detenimiento los datos, comprobamos que ésta aporta el 77,8 % de las ganancias totales, seguida muy de lejos por los bosques (13,2 %).

Analizando la matriz de cambios a este nivel, también es posible precisar con más detalle cuáles han sido los usos sustituidos por los artificiales, e incluso comprobar si se ha producido algún intercambio dentro de la misma categoría, hecho que mediante el análisis a nivel 1 es imposible averiguar. De la figura 4 se desprende que las zonas urbanas han aumentado su extensión a costa de espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea (40 % del total), seguido muy de cerca por las tierras de labor (38 %). Sin embargo también comprobamos que se da algún intercambio preocupante con otros tipos de superficies artificiales, puesto que, el 12 % del crecimiento de esta subcategoría (zonas urbanas) se ha nutrido de zonas de extracción minera, vertederos y de zonas en construcción, superficies que podrían presentar algún problema geotécnico a la hora de desarrollar una nueva zona urbana. De manera colectiva son sin duda las tierras de labor las que más terreno han cedido al conjunto de superficies artificiales (50,7 %), seguidas de la vegetación arbustiva y/o herbácea (30,7 %).

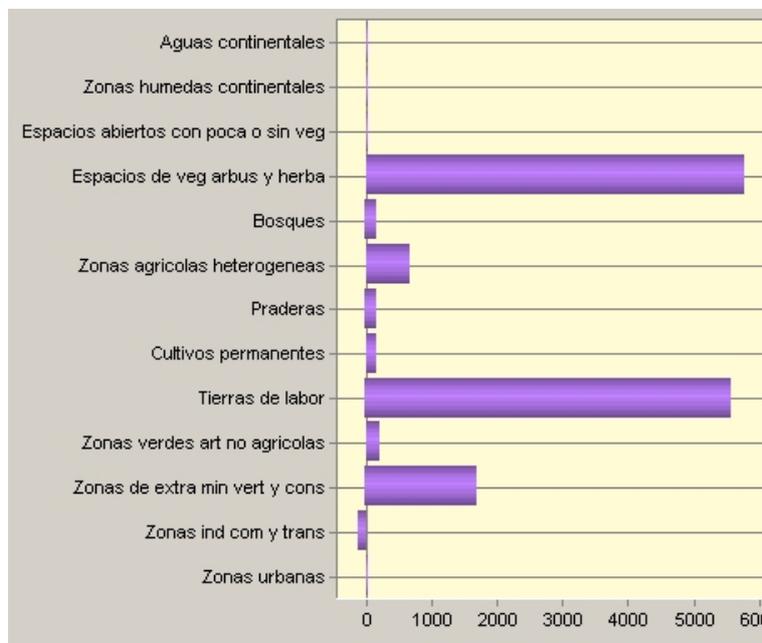


Figura 4. Pérdidas y ganancias de la categoría Zonas urbanas (CLC, nivel 2).

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del *Corine Land Cover* 1990 y 2000.

En cuanto al segundo grupo de usos ganadores (zonas forestales), son los espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea los que, en valores absolutos (13.687 ha) y proporcionales respecto al total de superficie (1,71 %), han experimentado mayores ganancias (Figura 5a). En este caso se producen intercambios más o menos importantes entre prácticamente todas las subcategorías, destacando la ocupación de espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea por parte de los bosques (representando casi el 90% de las ganancias de los mismos, Figura 5b). En cualquier caso, y como ya vimos en el análisis a nivel 1, el mayor volumen de terrenos ahora ocupados por estas subcategorías (concretamente por espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea) proviene de tierras de labor (68,5 %). Estos datos nos indican que se ha producido un fenómeno significativo de abandono de tierras agrícolas y regeneración espontánea de la vegetación. En este sentido también sería destacable el hecho de que hasta 289 ha ocupadas por explotaciones mineras, vertederos, etc., en 1990 se encuentran, en el 2000, ocupadas por espacios de vegetación arbustiva, lo que también indica un proceso ambientalmente positivo de regeneración de zonas degradadas.

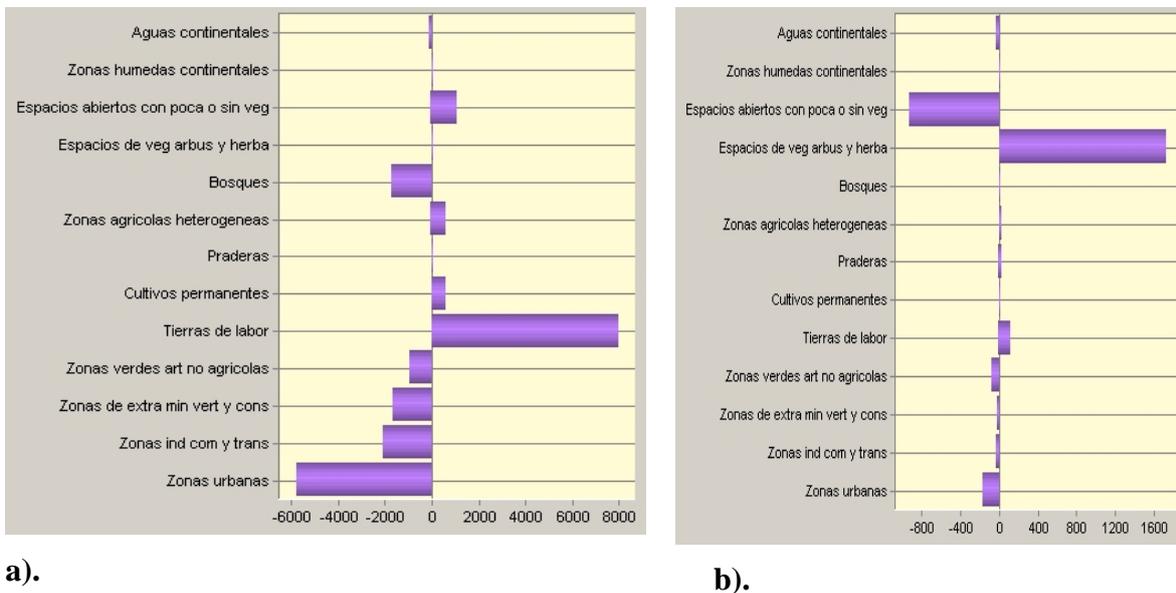


Figura 5. Pérdidas y ganancias de las categorías vegetación arbustiva y/o herbácea (a) y Bosques (b), CLC, nivel 2.

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del *Corine Land Cover* 1990 y 2000.

Lo anteriormente expuesto confirma que son las tierras de labor las que más terreno pierden en el período estudiado (29.870 ha). Sin embargo es necesario matizar que la mayor proporción de estos terrenos (casi un 60 %) ha abandonado su uso agrícola y ha pasado a formar parte de algún uso urbano (Figura 6).

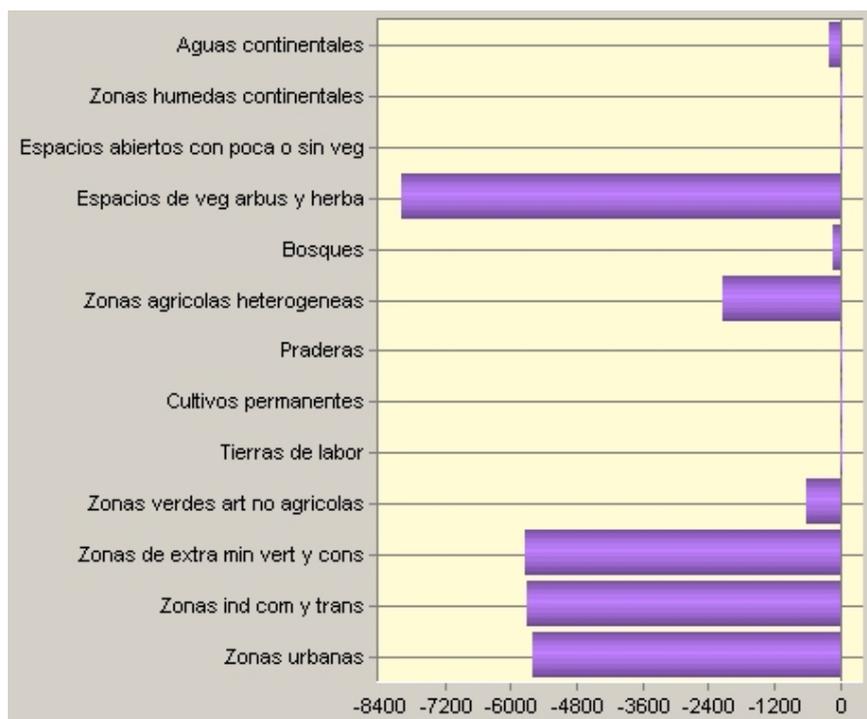


Figura 6. Pérdidas y ganancias de la categoría tierras de labor (CLC, nivel 2).

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del *Corine Land Cover* 1990 y 2000.

El segundo puesto con 15.592 ha lo ocupa, sin embargo, un uso forestal que también experimenta importantes ganancias, a saber los espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea. Esto la convierte en la categoría que experimenta un mayor volumen de intercambios y confirma lo importante de conocer la diferencia entre los cambios netos y cambios totales, pues nos informan de manera más precisa y real de las transformaciones acontecidas, permitiendo comprender mejor su significado. Lo mismo ocurre con las zonas de extracción minera, vertederos y de construcción, que ocupan el tercer y cuarto puesto, en cuanto a ganancias y pérdidas respectivamente, y el segundo puesto en volumen de intercambios, cuando en el análisis a nivel 1 las superficies artificiales destacaban por no haber experimentado prácticamente intercambios. En cuanto a los espacios que menos modificaciones han experimentado en la Comunidad de Madrid en este lapso de tiempo, son las praderas y los cultivos permanentes los que registran los valores más bajos, al margen de las zonas húmedas continentales.

No obstante, la posibilidad de poder dar un paso más en el análisis, descendiendo en el nivel de detalle de la clasificación de usos del suelo, nos ofrecía la oportunidad de poder desvelar algunos procesos más concretos, especialmente los relacionados con la urbanización del territorio. Así, se repitió el proceso a nivel 4 del Corine, contando

ahora con un total de 42 categorías, tras la homogeneización llevada a cabo para las dos fechas.

En primer lugar es necesario volver a destacar que una vez más se producen importantes intercambios entre las distintas subcategorías de una misma categoría general, lo que se traduce en todos los casos en un aumento de los valores absolutos de pérdidas y ganancias respecto al nivel 1 y 2 (Tabla 6).

Volviendo de nuevo a los usos del suelo netamente ganadores, encontramos que las superficies artificiales se desglosan en un total de 12 subcategorías, lo que nos permite matizar mejor los cambios acontecidos e incluso determinar la morfología del crecimiento urbano experimentado: ¿consolidación en forma de tejido urbano continuo?, ¿a base de urbanizaciones exentas? o ¿en forma de estructura urbana laxa?. En concreto, del análisis a nivel 4 se deriva que casi un 43,2 % de este terreno ganado se realizó a base de zonas urbanas, concretamente mediante urbanizaciones exentas y/o ajardinadas (47,5 %), estructura urbana laxa (44,4 %) y en menor medida tejido urbano continuo (8 %). Este dato confirma de manera rotunda el crecimiento urbano poco compacto que se está produciendo en la región, lo que conlleva unas connotaciones no muy positivas desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Este dato se agrava si tenemos en cuenta que, en realidad, los usos que han experimentado las mayores ganancias son los industriales o comerciales (21,7 % del total), lo que confirma por otro lado el gran dinamismo de estos sectores en la región y su preponderancia respecto a otras comunidades autónomas. Así, el porcentaje de incremento de superficie dedicada a estos usos creció un 118,8 % entre las dos fechas, lo que coloca a la Comunidad de Madrid en el cuarto puesto a nivel nacional detrás de Ceuta y Melilla (313,2 %), la región Murciana (151,9 %) y Navarra (138,3 %), y en una posición bastante alejada de otras regiones industriales tradicionales como Cataluña (que sólo vio incrementada su superficie en un 41,7 %) o el País Vasco (con un crecimiento neto del 28,7 %) (OSE, 2006).

Tabla 6. Indicadores de cambios en la Comunidad de Madrid en el período 1990-2000 (CLC nivel 4).

| Categorías | Ganancia Ha | Persistencia (%) | Pérdida Ha | CT Ha | CN Ha | Intercambio Ha |
|---|----------------|------------------|---------------|----------|----------|-------------------|
| SUPERFICIES ARTIFICIALES | | | | | | |
| Tejido Urbano Continuo | 1.257,7 | 1,36 | 53,7 | 1311,5 | 1.204,0 | 107,5 |
| Estructura urbana laxa | 6.939,2 | 1,18 | 1.184,0 | 8.123,2 | 5.755,2 | 2.368,0 |
| Urbanizaciones exentas y/o ajardinadas | 7.429,5 | 2,51 | 63,2 | 7.492,7 | 7.366,2 | 126,5 |
| Zonas industriales o comerciales | 7.874,5 | 0,79 | 165,5 | 8.040,0 | 7.709,0 | 331,0 |
| Autopistas, autovías y terrenos asociados | 700,5 | 0,50 | 0,0 | 700,5 | 700,5 | 0,0 |
| Complejos ferroviarios | 165,2 | 0,06 | 14,7 | 180,0 | 150,5 | 29,5 |
| Aeropuertos | 301,0 | 0,38 | 26,5 | 327,5 | 274,5 | 53,0 |
| Zonas de extracción minera | 2.067,0 | 0,11 | 662,0 | 2.729,0 | 1.405,0 | 1.324,0 |
| Escombreras y vertederos | 760,5 | 0,04 | 772,2 | 1.532,7 | 11,7 | 1.521,0 |
| Zonas en construcción | 6.323,7 | 0,03 | 2.017,5 | 8.341,2 | 4.306,2 | 4.035,0 |
| Zonas verdes urbanas | 1.273,2 | 0,29 | 133,0 | 1.406,2 | 1.140,2 | 266,0 |
| Instalaciones deportivas y recreativas | 1.048,7 | 0,18 | 114,2 | 1.163,0 | 934,5 | 228,5 |
| ZONAS AGRÍCOLAS | | | | | | |
| Tierras de labor en secano | 190.620,5 | 20,00 | 30.140,5 | 33.370,0 | 26.911,0 | 6.459,0 |
| Cultivos herbáceos en regadío | 32.548,5 | 3,65 | 3.225,0 | 5.088,2 | 1.361,7 | 3.726,5 |
| Otras zonas de irrigación | 48,7 | 0,01 | 0,0 | 225,5 | 225,5 | 0,0 |
| Viñedos | 8.770,0 | 1,01 | 670,7 | 670,7 | 670,7 | 0,0 |
| Frutales en secano | 124,2 | 0,01 | 25,2 | 47,5 | 3,0 | 44,5 |
| Frutales en regadío | 228,2 | 0,02 | 60,0 | 60,0 | 60,0 | 0,0 |
| Olivares | 11.987,2 | 1,45 | 318,5 | 436,0 | 201,0 | 235,0 |
| Praderas | 4.593,25 | 0,54 | 267,2 | 273,0 | 261,5 | 11,5 |
| Mosaico de cultivos anuales con praderas y/o pastizales | 1.217,0 | 0,14 | 68,0 | 1.252,5 | 1.116,5 | 136,0 |
| Mosaico de cultivos permanentes | 4.536,2 | 0,53 | 276,7 | 276,75 | 276,7 | 0,0 |
| Mosaico de cultivos anuales con cultivos permanentes | 32.542,7 | 3,80 | 2.008,7 | 2.120,5 | 1.897,0 | 223,5 |
| Terrenos principalmente agrícolas | 25.288,7 | 2,89 | 2.099,7 | 4.636,2 | 436,7 | 4.199,5 |
| Sistemas agroforestales | 22.724,2 | 2,75 | 639,7 | 1.220,2 | 59,2 | 1.161,0 |
| ZONAS FORESTALES | | | | | | |
| Perennifolias y quejigales | 342,0 | 2,34 | 345,5 | 687,5 | 3,5 | 684,0 |
| Caducifolias y rebollares | 412,5 | 1,19 | 1.418,5 | 1831,0 | 1.006,0 | 825,0 |
| Otras frondosas de plantación | 1.700,5 | 0,14 | 4,2 | 1.704,7 | 1.696,2 | 8,5 |
| Panaceas | 1.265,5 | 5,43 | 1.273,5 | 2.539,0 | 8,0 | 2.531,0 |
| Bosque mixto | 175,0 | 0,49 | 188,7 | 363,7 | 13,7 | 350,0 |
| Pastizales supraforestales | 112,2 | 0,36 | 306,2 | 418,5 | 194,0 | 224,5 |
| Otros pastizales | 7.436,0 | 12,50 | 14.716,5 | 22.152,5 | 7.280,5 | 14.872,0 |
| Vegetación Esclerófila | 5.652,7 | 13,21 | 6.338,7 | 11.991,5 | 686,0 | 11.305,5 |
| Matorral boscoso de transición | 9.275,2 | 9,64 | 3.020,2 | 12.295,5 | 6.255,0 | 6.040,5 |
| Playas dunas y arenales | 236,5 | 0,02 | 49,7 | 286,25 | 186,7 | 99,5 |
| Roquedo | 7,0 | 0,35 | 1.576,5 | 1.583,5 | 1.569,5 | 14,0 |
| Cárcavas y zonas en proceso de erosión | 12,5 | 0,08 | 45,75 | 58,2 | 33,25 | 25,0 |
| Espacios orofilos altitudinales con vegetación escasa | 1.322,5 | 0,02 | 116,0 | 1.438,5 | 1.206,5 | 232,0 |
| ZONAS HÚMEDAS | | | | | | |
| Humedales y zonas pantanosas | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SUPERFICIES DE AGUA | | | | | | |
| Ríos y cauces naturales | 0,00 | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Lagos y lagunas | 394,0 | 0,03 | 63,75 | 457,7 | 330,2 | 127,5 |
| Embalses | 258,5 | 0,55 | 149,75 | 408,2 | 108,7 | 299,5 |

El cuarto lugar (detrás de las estructuras urbanas laxas y las urbanizaciones ajardinadas) lo ocuparían las zonas en construcción (17,4 % del total), lo que nos indica claramente que el fenómeno de artificialización de la región continúa... De hecho se trata de la subcategoría que más incremento experimenta respecto a la superficie que ocupaba en 1990 (190 %). No obstante, este proceso incesante de urbanización sigue sin verse acompañado de un aumento de población que justifique dicho crecimiento ya que entre 1990 y 2000 la población de la Comunidad de Madrid se incrementó en menos de un 9 %.

Por último, destacar el discreto incremento de las zonas de extracción minera (2.067 ha) en una región considerada como superpotencia minera poco valorada y explotada (El País, 03/09/2007). Este incremento se localiza fundamentalmente en el sureste de la Comunidad de Madrid entorno al río Jarama, lo que nos confirma que fundamentalmente se trata de un incremento de la actividad de extracción de grava en la región.

En cuanto a los terrenos que han sido engullidos por el proceso de urbanización, este análisis más detallado vuelve a confirmar los datos obtenidos ya a nivel 2, es decir, que son las tierras de labor y otros pastizales las que aportan el mayor volumen de tierras, superando entre ambas siempre el 50 % del total (el 81 % en el caso de zonas industriales o comerciales y casi el 100 % en el caso de complejos ferroviarios o aeropuertos). Podemos confirmar, por tanto, que este proceso no ha supuesto una merma importante de las zonas boscosas de la región, siendo las urbanizaciones exentas y/o ajardinadas las que mayor impacto han tenido sobre las mismas, incrementando hasta un 2,2 % de su superficie a costa de terrenos ocupados por perennifolias y quejigares, pináceas y bosques mixtos. Quizás también merecería la pena mencionar que el tímido incremento del tejido urbano continuo se ha producido en un 74 % a base de la estructura urbana laxa preexistente, lo que podría considerarse un dato positivo de compactación de la zona urbana.

Finalmente es necesario aclarar que el aumento de las vías de comunicación detectado (700 ha) es mucho menor del que realmente se ha producido en la región en este lapso de tiempo (entre 1984 y 2004 tan sólo la red de alta capacidad pasó de 319 a 1.000 km, Santiago, 2007) y en una región donde la proporción de redes de transporte e infraestructura es una de las mayores de España. Sin embargo no es posible determinar

con más detalle este cambio mediante los datos del CORINE puesto que sólo se identifican elementos lineales con un ancho mayor a 100 metros.

El análisis pormenorizado de las categorías forestales indica que es el matorral boscoso de transición el que aglutina algo más del 33 % de las ganancias, que ahora aumentan hasta 27.950 ha debido a los intercambios que se producen entre las 13 subcategorías establecidas. De hecho, en términos absolutos es la subcategoría que experimenta el mayor crecimiento con 9.275 ha, sensiblemente alejada de las zonas industriales o comerciales que ocupan el segundo puesto con 7.874 ha. El segundo puesto del grupo de las zonas forestales lo ocuparía la vegetación esclerófila con un 20 % del incremento. En ambos casos son los terrenos catalogados como otros pastizales y las tierras de labor en secano los que nutren fundamentalmente estos nuevos terrenos. Este dato evidencia el proceso de abandono de la actividad agrícola y ganadera de la región, que al igual que en otras partes del país (Peña y otros, 2007), ha sido en gran parte fomentado por la Política Agraria Comunitaria (PAC) que, a partir de la reforma de 1992 y hasta la del año 2000, ofrece subvenciones para abandonar este tipo de actividades ante una situación de excedentes alimentarios y fomenta la reforestación de espacios poco productivos.

El tercer puesto, ya bastante alejado de estas dos categorías catalogadas en el nivel 2 como vegetación arbustiva, estaría ocupado por la subcategoría de bosques identificada como frondosas de plantación con un 6 % de las ganancias. En este caso el análisis más detallado nos sorprende de manera poco grata, pues comprobamos que el incremento se ha debido en un 80 % a terrenos que en 1990 se encontraban ocupados por caducifolias y rebollares.

En cuanto a las ganancias experimentadas por las aguas continentales comprobamos, como apuntábamos al principio, que se deben al incremento de lagos y lagunas (394 ha).

Si nos detenemos en los usos que más han mermado su presencia en la región, este análisis más detallado arroja que son las tierras de labor en secano las que experimentan las mayores pérdidas de todas las zonas agrícolas (el 75,7 % del total), cuando en el nivel 2 ocupaba el segundo puesto detrás de las zonas agrícolas heterogéneas, cuyas subcategorías a este nivel sólo aglutinan ahora el 12,7 %. No obstante, cabe matizar que

aunque las ganancias experimentadas por esta gran categoría son mínimas, son también las tierras de labor en secano las que mayor porcentaje suponen respecto al total (32,6), seguidas de los terrenos principalmente agrícolas (25,7). Por otro lado, el 52,5 % del incremento de las tierras de labor en secano se produce a base de cultivos herbáceos en regadío, mientras que el 68 % del incremento de los terrenos principalmente agrícolas se produce a base de tierras de labor en secano.

En cuanto a las zonas forestales, y concretamente las pérdidas experimentadas por los espacios de vegetación arbustiva, es la subcategoría otros pastizales la que aglutina el 50 % del decremento total, seguido por la vegetación esclerófila (21,5 %) y el matorral boscoso de transición (10,2 %). Estas son las categorías que presentan, por otro lado, las mayores tasas de intercambio.

Resumiendo, si realizamos un análisis global en función de los cambios netos (ganancias menos las pérdidas), obtenemos que son las zonas industriales o comerciales, las urbanizaciones exentas y/o ajardinadas las que presentan un cambio neto positivo mayor, siendo otros pastizales los que registran el mayor cambio neto negativo (lo que indica un claro predominio de las pérdidas sobre las ganancias). Si consideramos el cambio total, son las tierras de labor en secano las que ocupan el primer puesto, sin embargo, el segundo lugar también lo detentan otros pastizales, pues también suman un importante volumen de hectáreas perdidas y ganadas en el período estudiado. De hecho, se trata de la categoría que en términos absolutos registra la tasa más importante de intercambios, seguida de la vegetación esclerófila.

4.2. Análisis de las transiciones sistemáticas. ¿Son los cambios que se producen en la región realmente significativos?

Con el objetivo de verificar si las ganancias y las pérdidas registradas fueron significativas o no en relación con la configuración de los distintos usos del suelo de la región en 1990, se procedió a calcular y analizar las transiciones sistemáticas en los términos propuestos por Pontius y otros (2004). En este sentido, también parece razonable realizar el análisis a distintos niveles y así poder matizar e interpretar mejor los resultados.

Los datos que aparecen en el tabla 7 arrojan que son las superficies artificiales las únicas que registran una tasa de ganancia significativamente superior a la esperada (8

veces más). En cuanto a las transiciones sistemáticas en función de las pérdidas, prácticamente todas las categorías obtienen tasas muy cercanas a las esperadas, siendo las zonas agrícolas las únicas que han perdido por encima de lo esperado.

Tabla 7. Transiciones significativas en función de pérdidas y ganancias (CLC, nivel 1)

| | Ganancia observada | Ganancia esperada | Tasa de ganancia | Pérdida observada | Pérdida esperada | Tasa de pérdida |
|-------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Sup. Artificiales | 31.417,75 | 3.414,3 | 8,20 | 483,50 | 2311,3 | -0,79 |
| Zonas Agrícolas | 2.340,75 | 22.359,3 | -0,90 | 32.264,00 | 24.550,8 | 0,31 |
| Zonas Forestales | 12.111,25 | 19.127,4 | -0,37 | 13.561,25 | 19.197,6 | -0,29 |
| Zonas Húmedas | 0 | 4,7 | -1,00 | 0 | 4,7 | -1,00 |
| Sup. Agua | 652,50 | 491,9 | 0,33 | 213,50 | 457,9 | -0,53 |

¿Y cuál ha sido el comportamiento de intercambio entre las distintas categorías? Con esta metodología es posible también averiguar si las ganancias y las pérdidas de una determinada categoría hacia otra han sido o no significativas. En este caso parece más adecuado realizar el análisis con un conjunto mayor de categorías para poder extraer conclusiones más razonables. El nivel 2 del CORINE resulta en este sentido el más apropiado, sin embargo las tasas individuales pueden no ser demasiado significativas, siendo los resultados más interesantes cuando se contempla el reemplazo experimentado por una categoría respecto a un conjunto de otras categorías. En las tablas 8 y 9 aparece un resumen de los resultados para los casos más relevantes. Así, comprobamos que las zonas verdes no artificiales y las zonas urbanas sustituyeron a las zonas de extracción minera, vertederos y de construcción 35 y 17,5 veces más a lo esperado respectivamente. Éstas dos (zonas verdes y zonas urbanas), junto a las zonas industriales, comerciales y de transporte y los espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea, crecieron a base de esta categoría (extracción minera) 2.926 ha más de lo esperado, ver Tabla 8.

El reemplazo de los espacios abiertos con poca o sin vegetación por los espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea y las aguas continentales también superó ampliamente las tasas esperadas y aunque en el caso de las tierras de labor las tasas no llegan a superar en ningún caso el 1,5, sí que resulta significativo que la ocupación de

estos terrenos por parte de las cinco categorías que aparecen en la tabla haya sido de 12.341 ha por encima de lo esperado.

Tabla 8. Transiciones sistemáticas más significativas en función de las ganancias (CLC, nivel 2).

| Transición | | Diferencia | Tasas | Interpretación de las transiciones sistemáticas |
|---|--|------------|-------|---|
| 1990 | 2000 | Has | | |
| Zonas de extensión minera, vertederos y de construcción | Zonas urbanas | 1.661,98 | 17,54 | Cuando las categorías en el año 2000 ganaron, estas remplazaron a las zonas de extracción minera, vertederos y de construcción en 2.926,66 has más a las esperadas. |
| | Zonas industriales, comerciales y de transporte | 608,98 | 10,82 | |
| | Zonas verdes no artificiales | 503,89 | 35,10 | |
| | Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea | 151,81 | 1,10 | |
| Tierras de labor | Zonas urbanas | 1.306,69 | 0,30 | Cuando las categorías en el año 2000 ganaron, estas remplazaron a las tierras de labor en 12.341,26 has más a las esperadas. |
| | Zonas industriales, comerciales y de transporte | 3.166,32 | 1,24 | |
| | Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción | 3.322,50 | 1,31 | |
| | Zonas agrícolas heterogéneas | 1.383,24 | 1,44 | |
| | Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea | 3.162,51 | 0,51 | |
| Espacios abiertos con poca o sin vegetación | Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea | 1.465,39 | 9,48 | Cuando las categorías en el año 2000 ganaron, estas remplazaron a los espacios abiertos con poca o sin vegetación en 1.575,59 has más a las esperadas. |
| | Aguas continentales | 110,20 | 24,22 | |

Si atendemos a las transiciones en función de las pérdidas, observamos en primer lugar que las tasas esperadas son más ampliamente superadas que en el caso anterior (comparar Tabla 8 y Tabla 9). Esto demuestra la necesidad de realizar este tipo de análisis a distintos niveles de detalle, pues al nivel 1 ninguna de las categorías generales presentaba tasas significativas en este sentido.

Así, las principales “abastecedoras” de las zonas urbanas experimentaron hasta 11 veces más pérdidas en el período estudiado y así podemos prever que sucederá en el futuro, pues los reemplazos hacia zonas de extracción minera, vertederos y de construcción

también superan ampliamente las tasas esperadas (las zonas agrícolas heterogéneas fueron sustituidas en un volumen 17 veces superior a lo que hubiera sido previsible).

Tabla 9. Transiciones sistemáticas más significativas en función de las pérdidas (CLC, nivel 2).

| Transición | | Diferencia | Tasas | Interpretación de las transiciones sistemáticas |
|--|--|------------|-------|--|
| 1990 | 2000 | Has | | |
| Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción | | 1.517,63 | 6,35 | Cuando las categorías en el año 1990 perdieron, éstas fueron remplazadas por las zonas urbanas en 9.178,12 has más a las esperadas. |
| Zonas verdes artificiales, no agrícolas | | 191,58 | 10,99 | |
| Tierras de labor | | 2.830,97 | 1,03 | |
| Cultivos permanentes | Zonas Urbanas | 66,55 | 0,89 | |
| Praderas | | 170,21 | 9,06 | |
| Zonas agrícolas heterogéneas | | 381,00 | 1,29 | |
| Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea | | 4.020,18 | 2,27 | |
| Tierras de labor | | 4.584,34 | 4,07 | Cuando las categorías en el año 1990 perdieron, éstas fueron remplazadas por las zonas industriales, comerciales y de transporte en 5.940,61 has más a las esperadas. |
| Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea | Zonas industriales, comerciales y de transporte. | 1.356,27 | 1,88 | |
| Tierras de labor | Zonas de extracción minera, | 5.338,65 | 10,21 | Cuando las categorías en el año 1990 perdieron, éstas fueron remplazadas por las zonas de extracción minera, vertederos y de construcción en 7.885,87 has más a las esperadas. |
| Zonas agrícolas heterogéneas | vertederos y de construcción | 962,99 | 17,27 | |
| Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea | | 1.584,23 | 4,71 | Cuando las categorías en el año 1990 perdieron, éstas fueron remplazadas por las zonas verdes artificiales, no agrícolas en 1.072,55 has más a las esperadas. |
| Tierras de labor | Zonas verdes artificiales, no agrícolas | 297,41 | 0,99 | |
| Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea | | 775,14 | 4,02 | |
| Espacios abiertos con poca o sin vegetación | Aguas continentales | 100,50 | 7,05 | Quando las categorías en el año 1990 perdieron, éstas fueron remplazadas por las aguas continentales en 100,50 has más a las esperadas. |

No obstante, el estudio a nivel 4 se hace necesario para obtener más información sobre aquellas categorías que representan el proceso de cambio más importante que se ha producido en la región y con mayores consecuencias ambientales, es decir, el crecimiento urbano.

Así, si analizamos las transiciones en función de las ganancias (Tabla 10) es la subcategoría de las superficies artificiales, zonas en construcción, la que ocupa el primer puesto creciendo hasta 8 veces más de lo esperado, lo que nos está adelantando de alguna forma lo que va a acontecer en los años posteriores. El segundo puesto lo ocuparían otras zonas de irrigación, registrando una tasa de ganancia de 6,6.

En general, dentro de la categoría general de superficies artificiales encontramos que tan sólo 3 de las 12 subcategorías no registran transiciones significativas, destacando, además de la ya mencionada, las escombreras y vertederos, las zonas de extracción minera o las zonas industriales y comerciales con tasas de 5,5, 5,5 y 4, respectivamente, de incremento mayor al esperado. Del tejido urbano propiamente dicho, sólo encontramos un incremento significativo de la estructura urbana laxa, con una tasa 3 veces superior a la esperada. Sin embargo, de las trece subcategorías identificadas para las zonas agrícolas, además de la ya mencionada, tan sólo el mosaico de cultivos anuales con praderas y/o pastizales registra cambios significativos casi cuatro veces superior a lo esperado. Algo parecido sucede en el caso de las zonas forestales, pues sólo las playas, dunas y arenales y otras frondosas de plantación aumentan su presencia en el paisaje de la región 5 y 4 veces más de lo esperado.

Tabla 10. Transiciones significativas en función de pérdidas y ganancias (sólo aparecen las categorías del nivel 4 que obtuvieron tasas superiores a 3).

| Categoría | Pérdida Observada | Pérdida Esperada | Tasa pérdida | Ganancia Observada | Ganancia Esperada | Tasa ganancia |
|---|-------------------|------------------|--------------|--------------------|-------------------|---------------|
| Estructura urbana laxa | 1.184,0 | 962,0 | 0,2 | 6.939,3 | 1.743,6 | 3,0 |
| Zonas industriales o comerciales | 165,5 | 578,4 | -0,7 | 7.874,5 | 1.526,9 | 4,2 |
| Zonas de extracción minera | 662,0 | 151,6 | 3,4 | 2.067,0 | 318,2 | 5,5 |
| Escombreras y vertederos | 772,3 | 108,2 | 6,1 | 760,5 | 116,5 | 5,5 |
| Zonas en construcción | 2.017,5 | 206,4 | 8,8 | 6.323,8 | 691,4 | 8,1 |
| Otras zonas de irrigación | 0,0 | 4,8 | -1,0 | 225,5 | 29,6 | 6,6 |
| Mosaico de cultivos anuales con praderas y/o pastizales | 68,0 | 118,8 | -0,4 | 1.184,5 | 251,3 | 3,7 |
| Otras frondosas de plantación | 4,3 | 108,3 | -1,0 | 1.700,5 | 303,2 | 4,6 |
| Playas dunas y arenales | 49,8 | 17,4 | 1,9 | 236,5 | 39,1 | 5,0 |
| Humedales y zonas pantanosas | 0,0 | 6,0 | -1,0 | 0,0 | 6,5 | -1,0 |
| Ríos y cauces naturales | 0,0 | 99,7 | -1,0 | 0,0 | 108,5 | -1,0 |
| Lagos y lagunas | 63,8 | 32,6 | 1,0 | 394,0 | 71,2 | 4,5 |
| Embalses | 149,8 | 451,9 | -0,7 | 258,5 | 504,1 | -0,5 |

Atendiendo ahora a las pérdidas, es necesario, en primer lugar, mencionar que tan sólo 7 de las 42 subcategorías a este nivel de detalle registran tasas de cambio significativas. En este caso sí que son las superficies artificiales las que por mayoría registran tasas superiores a las esperadas. Así, vuelven a ser las zonas en construcción, las escombreras y vertederos o las zonas de extracción minera las que registran pérdidas 9, 6 y 3,4 veces superiores a lo esperado respectivamente.

4.3. Análisis de distancia a la que se producen los cambios. ¿Con qué radio de influencia se producen los principales cambios respecto a la distribución de las distintas categorías en 1990?

En el análisis de los cambios de usos del suelo que se producen entre distintas fechas es interesante incorporar algún otro dato que ayude a completar la interpretación de dichos cambios. Una cuestión que puede resultar relevante y de interés es analizar a partir de qué distancia de los usos existentes en el momento temporal 1 se producen los distintos cambios registrados en el momento temporal 2. Esto nos puede permitir obtener alguna pista sobre cuál es el radio de alcance de determinados procesos de cambio y en especial del relacionado con el crecimiento urbano o los procesos de deforestación. Una forma de obtener este dato es elaborar un mapa de distancias a cada categoría del tiempo 1 y multiplicarlo posteriormente por el mapa de ganancias o pérdidas de cada categoría. El resumen estadístico del mapa resultante nos ofrecerá información precisa sobre este hecho.

Realizado el análisis con las grandes categorías establecidas a nivel 1 (Tabla 11), los resultados muestran que el crecimiento de los principales usos del suelo se ha producido en las inmediaciones de las superficies ya existentes en 1990. Los porcentajes más elevados se registran para las zonas agrícolas (encontrándose el 95,4 % a menos de 500m) y las superficies artificiales (90,1 % a menos de un kilómetro), reduciéndose considerablemente para las superficies de agua, lo que probablemente vuelva a responder a los problemas de identificación que venimos mencionando.

Tabla 11. Radio de crecimiento de los distintos usos del suelo en relación a la superficie de ese uso existente en el año 1990 (CLC, nivel 1).

| Distancias Metros | Ganancias de Superficies artificiales | | Ganancias de Zonas agrícolas | | Ganancias de Zonas forestales | | Ganancias de Superficies agua | |
|----------------------|---------------------------------------|------|------------------------------|------|-------------------------------|------|-------------------------------|------|
| | Hectáreas | % | Hectáreas | % | Hectáreas | % | Hectáreas | % |
| 0 – 500 | 22.429 | 71,4 | 2.233,75 | 95,4 | 8628,0 | 71,2 | 369,25 | 56,6 |
| 500 - 1000 | 5.890 | 18,7 | | | 1.670,7 | 13,8 | 98,25 | 15,1 |
| 1000 – 2000 | 2.433 | 7,7 | 107 | 4,6 | 1.370,0 | 11,3 | 38,75 | 5,9 |
| > 2000 | 666 | 2,1 | | | 442,5 | 3,6 | 146,25 | 22,4 |
| TOTAL | 31.418 | 100 | 2.340,75 | 100 | 12.111,2 | 100 | 652,50 | 100 |

Realizado un análisis preliminar entre las distintas categorías, pudimos comprobar como un volumen importante del crecimiento de zonas forestales y agrícolas se produce a menos de 2 kilómetros de las superficies artificiales existentes en 1990 (37,4 % y 37,6 %, respectivamente), reduciéndose considerablemente a medida que aumenta la

distancia (Tabla 12). Esto pone de manifiesto que, al contrario de lo que se podría pensar, la presencia de núcleos urbanos no es un impedimento para que se lleven a cabo procesos de regeneración forestal en sus inmediaciones. No obstante, si realizamos el mismo análisis pero en función de las pérdidas, se evidencia que el mayor volumen de pérdidas de zonas agrícolas y forestales se registra indudablemente a menos de 500m de las superficies artificiales existentes en 1990. Si observamos los datos de la tabla 12, comprobamos que en el caso de las zonas forestales se llega a alcanzar casi el 68 %, disminuyendo de manera considerable a partir del kilómetro. Sin embargo, en el caso de las zonas agrícolas, el descenso es más progresivo.

Tabla 12. Radio en el que se producen las ganancias y pérdidas de zonas agrícolas y forestales respecto a las superficies artificiales de 1990 (CLC, nivel 1).

| | Zonas forestales | | Zonas agrícolas | | Zonas forestales | | Zonas agrícolas | |
|-----------------------------|------------------|-------|-----------------|-------|------------------|-------|-----------------|-------|
| | GANANCIAS | | | | PÉRDIDAS | | | |
| Distancia a s. artificiales | Ha | % (1) | Ha | % (1) | Ha | %(2) | Ha | %(2) |
| 0 – 500 | 2.076 | 17,1 | 524 | 22,4 | 9.186 | 67,7 | 16.091 | 49,9 |
| 500 – 1.000 | 2.457 | 20,3 | 357 | 15,2 | 2.101 | 15,5 | 6.657 | 20,6 |
| 1.000 – 2.000 | 4.324 | 35,7 | 624 | 26,6 | 1.333 | 9,8 | 6.156 | 19,1 |
| > 2.000 | 2.931 | 24,1 | 687 | 29,3 | 940 | 6,9 | 3.358 | 10,4 |
| TOTAL | 11.788 | 97,3 | 2192 | 93,6 | 13.560 | 100,0 | 32.262 | 100,0 |

(1) Porcentaje respecto al total de ganancias de zonas forestales y agrícolas respectivamente

(2) Porcentaje respecto al total de pérdidas de zonas forestales y agrícolas respectivamente

Por otro lado, la relación entre el crecimiento de las superficies artificiales respecto a las zonas agrícolas y forestales existentes en 1990 es más difícil de analizar, puesto que una parte importante de las mismas (de las zonas forestales) han sido engullidas por el proceso de urbanización, lo que determina que los porcentajes de la tabla 13 no sumen 100 %, una parte de las ganancias de urbano ocurren dentro de la antigua zona forestal por lo tanto su distancia a ella es de cero metros. No obstante, de las que quedaron al margen de este proceso de crecimiento, tenemos que un 15 % de las ganancias de superficies artificiales se produce a menos de 500m de las zonas agrícolas de 1990, siendo la distribución bastante homogénea y sensiblemente menor a partir de esa distancia. Una situación más o menos parecida se reproduce en el caso de las superficies forestales, registrándose hasta un 21,7 % de dichas ganancias a menos de 500m de una zona forestal. No obstante y para no llevar a confusión, decidimos analizar estas superficies a nivel 2 para poder matizar mejor estos resultados (Tabla 13). Realizados

los mapas de distancias a las tres subcategorías en las que se desglosan las superficies forestales en este nivel (bosques, espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea y espacios abiertos con poca o sin vegetación) y analizada la distribución de las ganancias de superficies artificiales, comprobamos como son los espacios de vegetación arbustiva los que se encuentran más cercanos a las zonas de crecimiento urbano, localizándose hasta un 62 % de dichas ganancias a más de 2 kilómetros de una zona de bosque.

Tabla 13. Radio de crecimiento de las superficies artificiales respecto a las zonas forestales existentes en el año 1990 (CLC, nivel 2).

| Distancias | Ganancias respecto a zonas forestales (Nivel 1) | | Ganancias respecto a bosques (Nivel 2) | | Ganancias respecto a espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea (Nivel 2) | | Ganancias respecto a espacios abiertos con poca o sin vegetación (Nivel 2) | |
|--------------|---|-------------|--|-------------|--|-------------|--|-------------|
| | Ha | % (1) | Ha | % (1) | Ha | % (1) | Ha | % (1) |
| 0 – 500 | 6.835,00 | 21,7 | 2.374,25 | 7,0 | 6.579,5 | 21,0 | 240,25 | 0,7 |
| 500 - 1000 | 4.621,75 | 14,7 | 2.976,00 | 9,4 | 4.736,5 | 15,2 | 269,50 | 0,8 |
| 1000 – 2000 | 4.912,75 | 15,6 | 6.259,50 | 20,0 | 5.075,0 | 16,1 | 774,75 | 2,4 |
| > 2000 | 3.960,25 | 12,6 | 19.499,75 | 62,0 | 4.266,0 | 13,5 | 30.114,25 | 95,8 |
| TOTAL | 20.329,75 | 64,7 | 31.109,50 | 99,0 | 20.657,0 | 65,7 | 31.398,75 | 99,9 |

(1) Porcentaje respecto a las 31.418 ha de ganancias de superficies artificiales

4.4. Distribución espacial de los cambios en general y de los relacionados con el crecimiento urbano en particular.

Si bien en el apartado 4.1 hemos realizado una primera reflexión sobre dónde se dan los principales cambios de usos del suelo acontecidos en la región, es posible volver a matizar estos resultados aportando algún dato más sobre dichos cambios a nivel municipal y acudiendo a los otros niveles del Corine para desvelar la distribución espacial de las subcategorías ganadoras y perdedoras más importantes.

Un análisis de los cambios experimentados a nivel 1 por municipio muestra cómo los municipios que registran los mayores porcentajes de crecimiento de superficies artificiales se concentran en el área metropolitana de Madrid y a lo largo de cualquiera de las carreteras nacionales que emanan del centro del municipio madrileño (Figura 7a). En el caso de las zonas forestales (uso que ocupa el segundo puesto en cuanto a ganancias entre las dos fechas) comprobamos que no hay una concentración que pueda indicarnos algún tipo de patrón de distribución del incremento de las mismas, ya que, en general, casi todos los municipios participan de dicho incremento, destacando alguno del área metropolitana como Rivas-Vaciamadrid (Figura 7b). Sería reseñable, por otro

lado, que es en el área de la sierra donde se registran los menores porcentajes de ganancia de este tipo de ocupación.

Observando la distribución de las pérdidas, comprobamos como el mapa de las zonas agrícolas es casi una versión simétrica del mapa de ganancias de superficies artificiales. No en vano más de un 60 % del crecimiento de éstas se ha producido a costa de terrenos agrícolas. No obstante, si nos centramos en los municipios recorridos por la Nacional VI a su salida de Madrid, observamos claramente que el crecimiento de la superficie construida en esta zona no se ha llevado a cabo a base de terrenos agrícolas, sino forestales principalmente (Figura 7c).

No obstante y como ya hemos advertido en apartados anteriores, esta reflexión sobre las zonas forestales nos puede llevar a confusión, por lo que es necesario analizar la distribución de los cambios registrados a un nivel mayor de detalle.

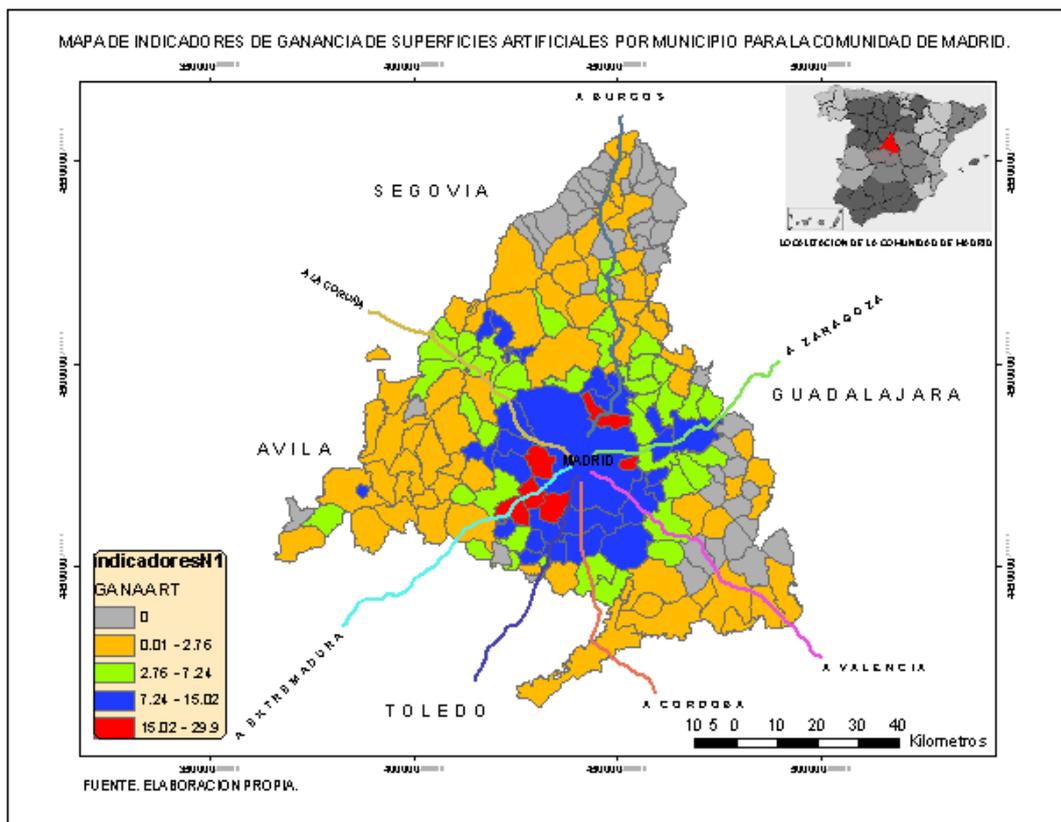


Figura 7a. Ganancias de las superficies artificiales (1990-2000) por municipio (nivel 1)

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del *Corine Land Cover* 1990 y 2000. Centro Nacional de Información Geográfica

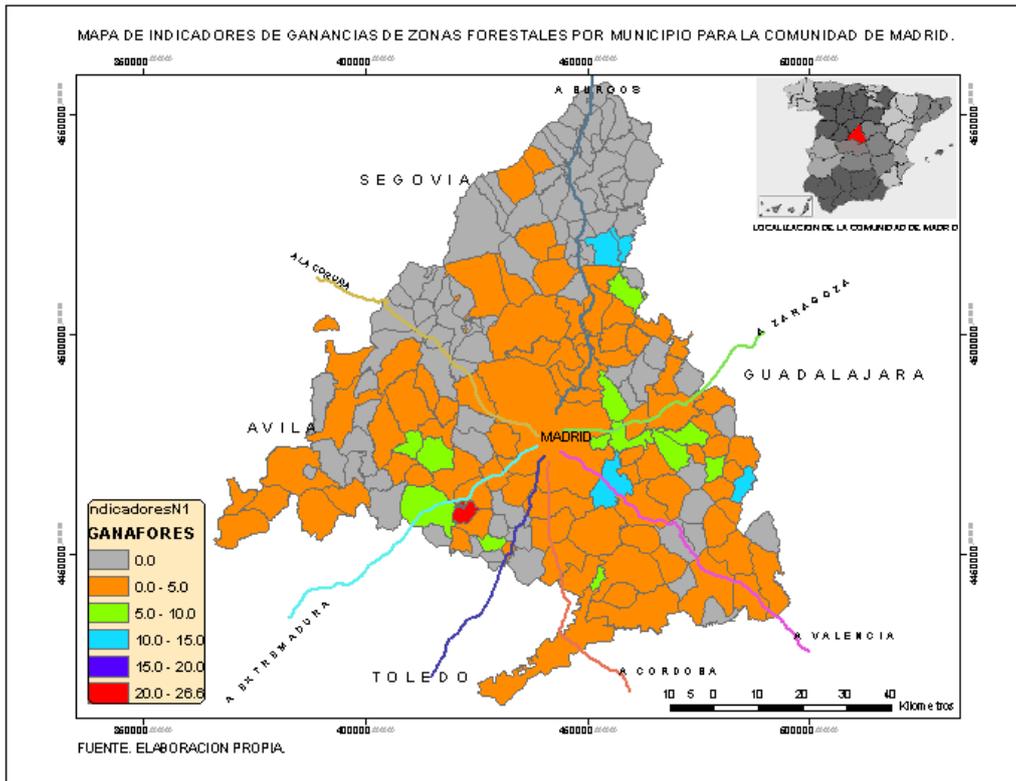


Figura 7b. Ganancias de las zonas forestales (1990-2000) por municipio (nivel 1)
Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del *Corine Land Cover* 1990 y 2000. Centro Nacional de Información Geográfica

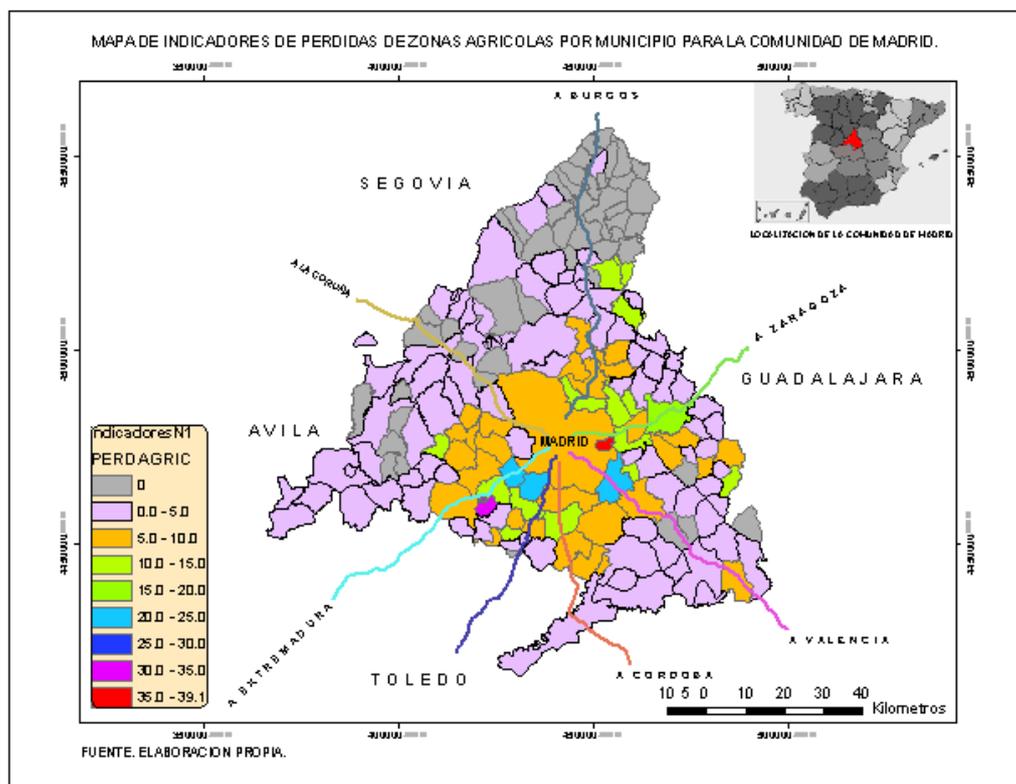


Figura 7c. Pérdidas de las zonas agrícolas (1990-2000) por municipio (nivel 1)
Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del *Corine Land Cover* 1990 y 2000. Centro Nacional de Información Geográfica

Si nos centramos en primer lugar en el resultado cartográfico de este análisis a nivel 2 para las principales categorías ganadoras, comprobamos como el proceso de urbanización ha afectado a casi todos los municipios de la región en mayor o menor medida (Figura 8a), produciéndose en zonas cada vez más alejadas del área metropolitana central. En el caso de las zonas de extracción minera, vertederos y de construcción (Figura 8b), el mayor volumen de ganancias se concentra en el municipio de Madrid y en algunos municipios del área metropolitana (Rivas-Vaciamadrid, Alcalá de Henares, Las Rojas o Leganés). Sin embargo, también destacan otros municipios de la tercera corona metropolitana (según clasificación de García Ballesteros y Sanz Berzal, 2002) como San Martín de la Vega o Arganda del Rey.

Del mapa de distribución de los espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea destaca, en primer lugar, el alto porcentaje de persistencia en el paisaje de este uso (Figura 8c), a pesar de ser uno de los grandes perdedores y ganadores en este período. Por otro lado, es de destacar que tanto las ganancias como las pérdidas se distribuyen por todo el territorio regional, incluso en los municipios más urbanizados del área metropolitana (ver municipios a lo largo de la Nacional II). Sin embargo, si nos centramos en las pérdidas, observamos con preocupación la importante merma de este tipo de vegetación en el municipio madrileño, en Pozuelo de Alarcón y a lo largo del recorrido de la Nacional VI, llegando a los municipios de la Sierra. De nuevo podemos comprobar como esas pérdidas coinciden en gran parte con la expansión del territorio urbanizado. En este sentido, es de destacar el importante incremento de estas superficies en los bordes del área metropolitana. Como ya hemos comentado, gran parte de este terreno son zonas agrícolas y pastizales abandonados, que probablemente ahora espera su turno para ser urbanizado. En el norte de la región casi todas las pérdidas que se registran son pastizales que se han convertido en matorrales subarbustivos, lo que refleja claramente el impacto de la PAC en la zona y la impronta en el paisaje del abandono de la actividad ganadera.

Finalmente y observando la figura 8d, comprobamos como efectivamente las tierras de labor son las grandes perdedoras, aún registrando también un importante porcentaje de persistencia. Como aspecto menos negativo podemos mencionar el hecho de que existe una importante reducción de estos usos en las zonas más antropizadas (municipio de Madrid, área metropolitana y primeras coronas), donde la producción de los cultivos no

es excesivamente rentable. Sin embargo, y especialmente si observamos la distribución de las persistencias, esta reducción supone una fragmentación o “ruptura” del paisaje existente. Finalmente es destacable el importante proceso de abandono de terrenos agrícolas y regeneración de la vegetación en municipios como Arroyomolinos, Navalcarnero, Brunete o Quijorna. Sin embargo, y dados los procesos de urbanización acontecidos en años posteriores, esta “regeneración” ha tenido una vida efímera.

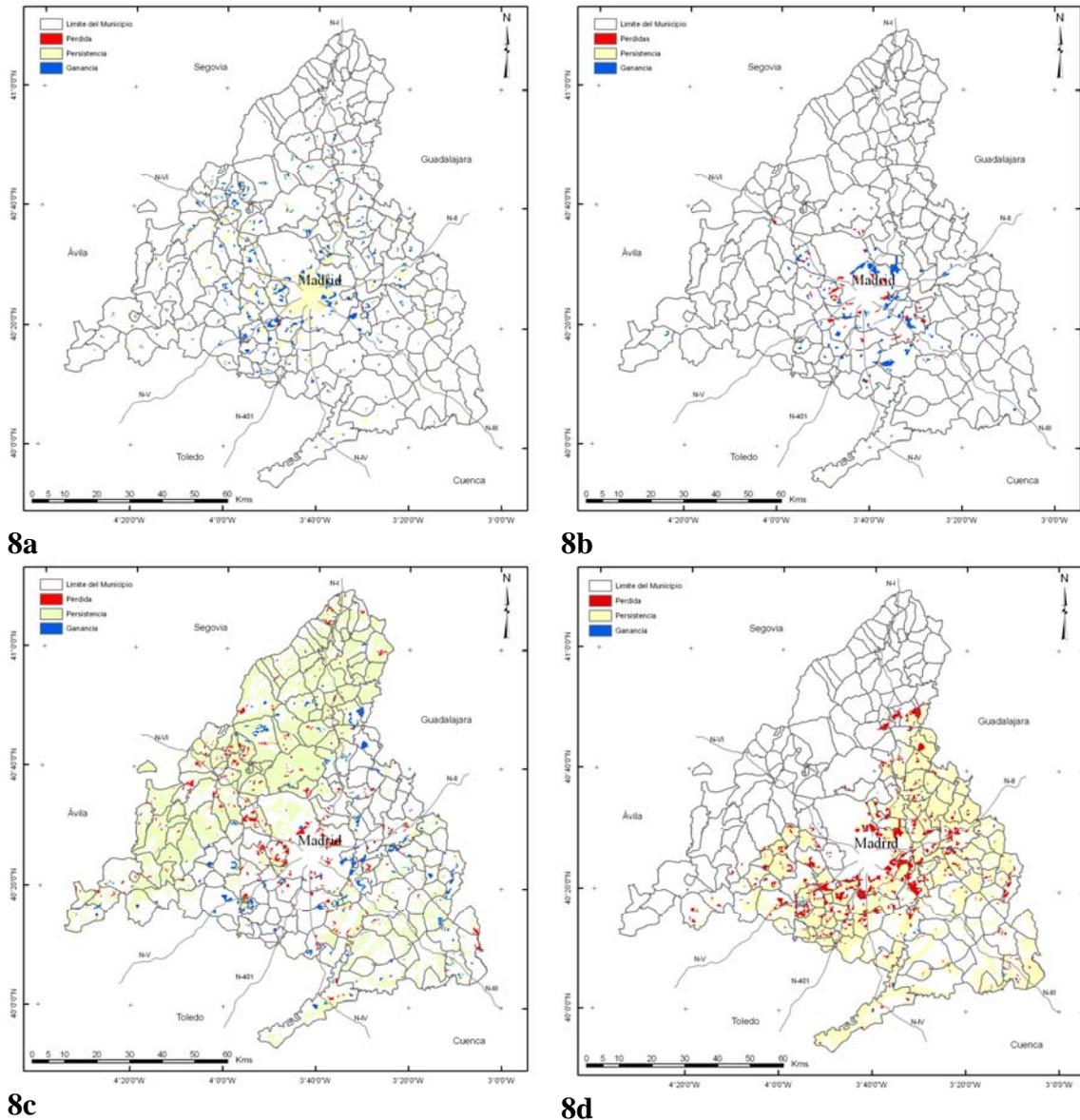


Figura 8. Pérdidas, ganancias y persistencia de las principales categorías ganadoras, nivel 2: Zonas urbanas (8a); zonas de extracción minera, vertederos y de construcción (8b); zonas de vegetación arbustiva y/o herbácea (8c) y tierras de labor (8d).

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del *Corine Land Cover* 1990 y 2000. Centro Nacional de Información Geográfica

Dado el intenso proceso de urbanización que experimenta la región entre 1990 y 2000, merece la pena realizar un análisis más detallado sobre la distribución espacial de este fenómeno acudiendo al nivel 4 del CORINE. Como avanzamos en el apartado 4.2, las superficies artificiales que registraron un mayor volumen de ganancias fueron, en este orden, las zonas industriales y comerciales (ZIC), las urbanizaciones exentas y/o ajardinadas (UEA), la estructura urbana laxa (EUL) y las zonas en construcción (ZC), registrando todas ellas transiciones significativas y sistemáticas a excepción de las urbanizaciones exentas y/o ajardinadas.

Del resto de categorías de manera resumida podemos destacar el hecho de que la gran mayoría de los cambios se localizan en el municipio de Madrid, aglutinando el 88 % de las ganancias del tejido urbano continuo y la mayor parte de las pérdidas y ganancias de las zonas catalogadas como escombreras y vertederos. Las instalaciones deportivas y recreativas aumentan de manera regular en muchos de los municipios de su área metropolitana y las zonas verdes aumentan de manera importante también en municipios como Pozuelo de Alarcón o Leganés.

La categoría EUL² registró un aumento de 6.950 ha, cuya distribución espacial aparece en la figura 9. Este terreno se ha ganado principalmente a las tierras de labor en secano (51 %), a los pastizales naturales (23 %) y, en menor medida, a zonas en construcción (13 %). Como ya mencionamos, las pérdidas registradas pasaron a convertirse en tejido urbano continuo. El resto se distribuye entre otras categorías también catalogadas como superficies artificiales, pero cuya transformación resulta menos fácilmente explicable. Probablemente los cambios de esta categoría a zonas en construcción o urbanizaciones exentas y/o ajardinadas se deban a los problemas de interpretación o las diferencias en cuanto a la unidad mínima cartografiable contemplada en una fecha y otra, ya mencionados en anteriores apartados.

Por otro lado, la categoría UEA³ incrementó su superficie en un total de 7.429 ha que provienen principalmente de pastizales naturales (32 %) y tierras de labor en secano (24 %). Las pérdidas, hasta cierto punto insignificantes (62 ha) y posiblemente debido a

² En esta categoría se incluyen las edificaciones abiertas con o sin espacios verdes asociados, tales como calles arboladas o pequeños parques y/o jardines. Son estructuras urbanas adosadas al núcleo mas compacto de la ciudad.

³ En esta categoría se incluyen las zonas de primera o segunda residencia, fuera de los núcleos urbanos y que disponen de espacios verdes.

errores de clasificación, se dieron hacia las categorías zonas industriales o comerciales (66 %), autopistas, autovías y terrenos asociados (21 %) y zonas en construcción (8 %).

La categoría ZIC⁴ se acrecentó con ganancias de 7.877 ha, siendo las tierras de labor en secano (62 %) y los pastizales naturales (19 %) sus principales proveedores.

Finalmente la categoría ZC⁵ experimentó un incremento de 6.331 ha, que provienen principalmente de las categorías tierras de labor en secano (64 %), pastizales naturales (16 %) y terrenos principalmente agrícolas (6 %). En este caso sí cobra sentido el registro de pérdidas de hasta 2.017 ha. Esta superficie se convirtió finalmente en zonas catalogadas como estructura urbana laxa (43 %), urbanizaciones exentas y/o ajardinadas (29 %), zonas industriales o comerciales (17 %) y en menor medida zonas verdes urbanas (9 %).

Del análisis espacial de los cambios ocurridos se desprende que este crecimiento se localiza principalmente en las cercanías a las carreteras y a los usos urbanos existentes (Figura 9), destacando la presencia de nuevas zonas en construcción en las proximidades de las carreteras de circunvalación madrileñas M-40, M-45 y M-50. En cuanto al patrón de distribución de las urbanizaciones exentas y/o ajardinadas, comprobamos que se produce un incremento muy importante en los municipios de la sierra y más cercanos a la carretera N-VI, lo que constata una continuación del proceso de proliferación de urbanizaciones destinadas a segunda residencia en las áreas rurales de la Comunidad iniciado allá por los años 60 (Aldana, 2005) y que responde a una demanda de espacios para el disfrute de la naturaleza, pero no muy alejados de las zonas urbanas centrales (Gutiérrez, 2002). Sin embargo, ahora también encontramos urbanizaciones de este tipo (algunas con una dimensión considerable) entorno a las principales vías de acceso rápido a Madrid, por lo que podríamos aventurarnos a afirmar que éstas ya no nacen con una vocación predominante de segunda residencia, sino como vivienda principal.

Finalmente, el hecho de no poder disponer de manera separada la superficie ocupada por zonas industriales y comerciales en 1990, nos impide llegar a alguna conclusión

⁴ En esta categoría se incluyen las zonas definidas como polígonos industriales cuya actividad es mayoritariamente industrial y las grandes zonas comerciales como hipermercados y zonas asociadas o grandes centros comerciales a las afueras de las ciudades.

⁵ En esta categoría se incluyen los espacios en construcción, excavaciones de suelo o roca firme, movimientos de tierra.

evidente sobre la gran incidencia que la aparición de grandes superficies comerciales en la región ha tenido sobre la aparición de nuevos desarrollos urbanos (Carrera y Chicharro, 2000; Santiago, 2007). No obstante, observando de nuevo la figura 9, observamos como junto a algunas de las nuevas zonas industriales y/o comerciales aparecen también importantes extensiones de estructura urbana laxa o inclusive zonas en construcción, especialmente entorno a las principales vías de comunicación.

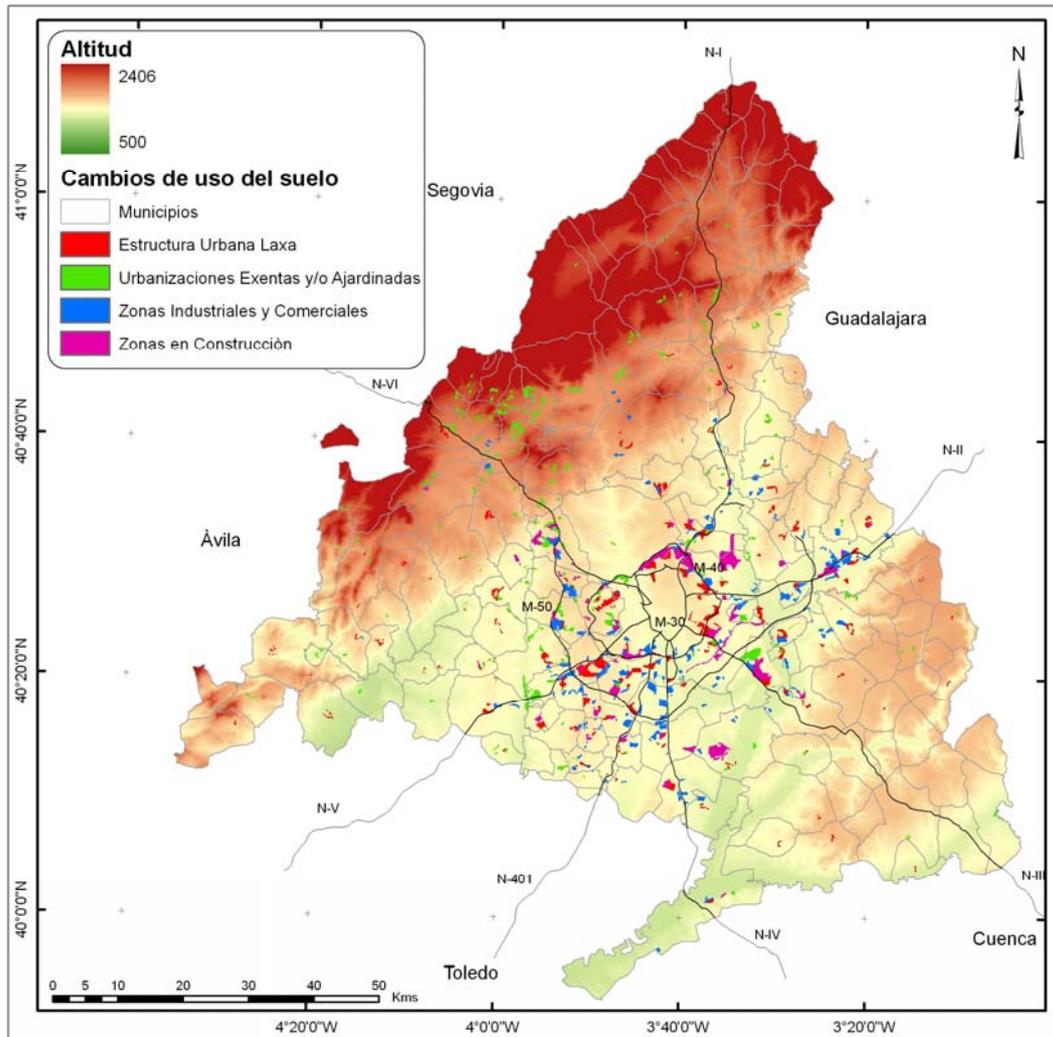


Figura 9. Localización de las 4 categorías artificiales con mayores ganancias.
Fuente. Elaboración propia a partir del CLC1990 y 2000. Centro Nacional de Información Geográfica

Si atendemos al aumento en términos de hectáreas por municipio, comprobamos que las ganancias de la categoría estructura urbana laxa se dieron principalmente en el municipio de Madrid y otros municipios de la orla metropolitana (Figura 10a). También, se aprecia que la categoría urbanizaciones exentas y/o ajardinadas aumentaron principalmente en el municipio de Madrid, zona oeste y en los municipios de la Sierra

(Figura 9 y 10b). Por su parte, las ganancias de la categoría zonas industriales o comerciales se dieron principalmente en los municipios de Madrid y en algunos municipios periféricos de la zona metropolitana (Figura 10c). Por último, las ganancias de la categoría zonas en construcción se dan principalmente en el municipio de Madrid y algunos municipios de la zona sur y este (Figura 10d).

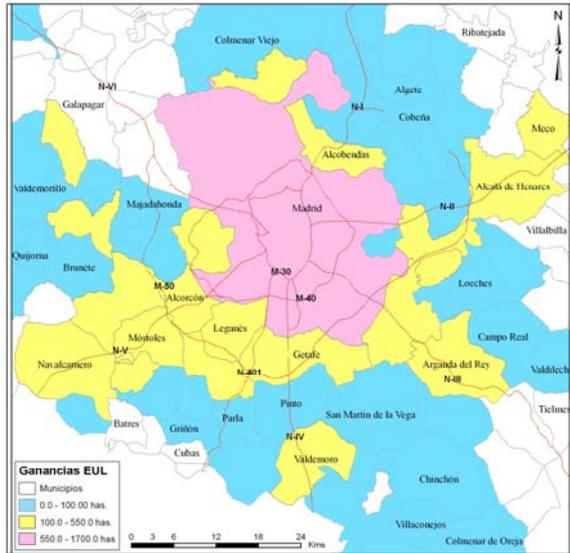


Figura 10a. Ganancias de EUL por municipio

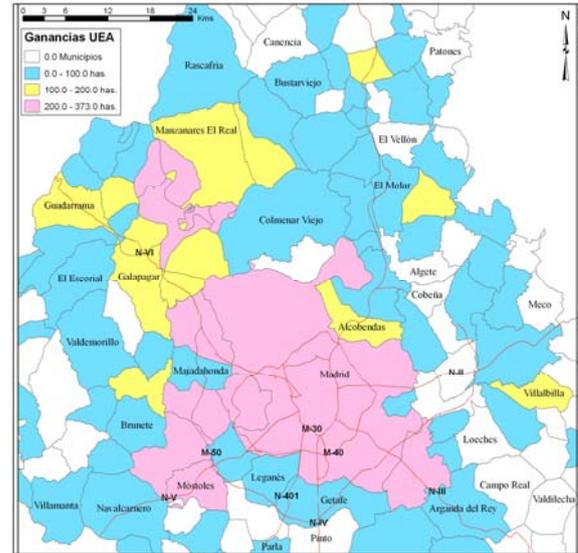


Figura 10b. Ganancias de UEA por municipio

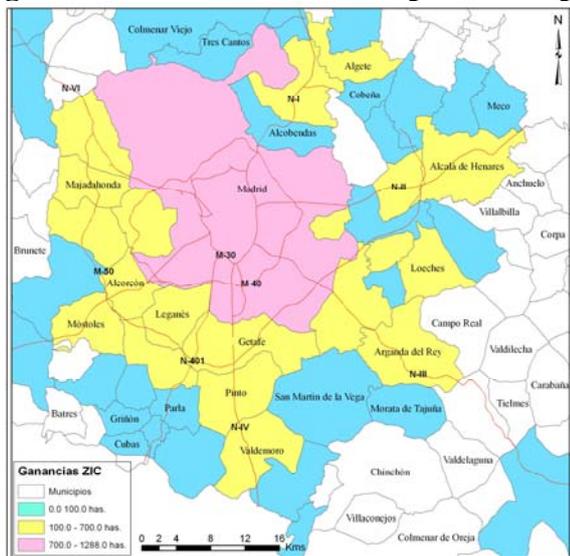


Figura 10c. Ganancias de ZIC por municipio

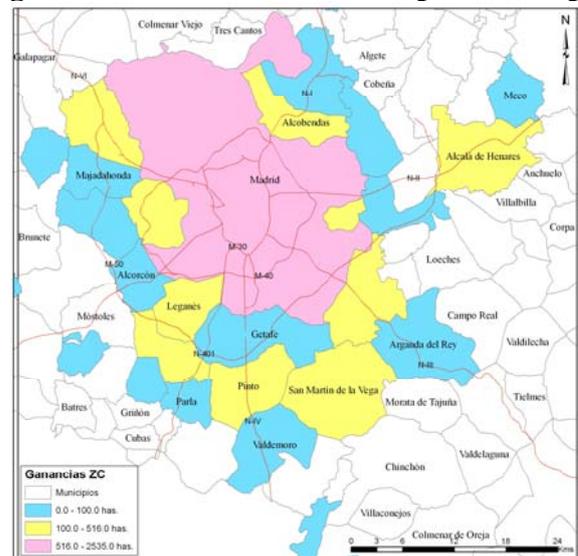


Figura 10d. Ganancias de ZC por municipio

Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del *Corine Land Cover 1990 y 2000*. Centro Nacional de Información Geográfica

5. CONCLUSIONES

A partir de los numerosos resultados comentados en los apartados anteriores se pueden obtener algunas conclusiones relevantes y significativas, las más importantes serían las siguientes:

- a) En la región de Madrid se ha producido un incremento muy importante de la superficie de las zonas urbanas existentes en 1990. En cifras de las mas elevadas de España en ese periodo (1990-2000).
- b) Este crecimiento urbano se ha realizado en gran medida a costa de antiguas zonas agrícolas y para el desarrollo de zonas de menor densidad residencial de lo que era lo habitual hasta hace poco en la región de Madrid: principalmente urbanizaciones exentas.
- c) En concreto, han sido especialmente afectadas las zonas de cultivos que en 1990 se encontraban cerca de áreas urbanas. Por otra parte, la disminución de las zonas agrícolas también se ha producido al pasar algunas de ellas a ser ocupadas por usos forestales (arbolado o vegetación arbustiva).
- d) Otra característica significativa de la dinámica de la ocupación del suelo en Madrid ha sido el mantenimiento en extensión superficial de las zonas forestales existentes en 1990 en la región.
- e) Las zonas forestales no han perdido tamaño pero si han visto bastante cambiada su posición geográfica en el territorio madrileño. Ha sido el tipo de ocupación del suelo que más ha sido afectado por los intercambios de territorio: eliminación del bosque en unos lugares, y crecimiento del bosque en áreas donde antes existían otros usos. En concreto, muchas zonas agrícolas situadas cerca de las antiguas zonas forestales han visto cambiar su uso para convertirse en nuevas zonas de arbolado o de vegetación natural.
- f) Finalmente, también se puede extraer alguna conclusión sobre la metodología empleada en el análisis de la dinámica de los usos del suelo. El planteamiento propuesto por Pontius y otros (2004) ha permitido detectar cambios y variaciones que no serían visibles de otra manera, lo que atestigua el valor y la utilidad de este enfoque para el estudio de la dinámica de la ocupación del suelo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aldana, A.T. (2005). “Cartografía de los cambios en las cubiertas artificiales de la Comunidad de Madrid-España”, *Revista forestal latinoamericana*, N° 35, pp. 59-86.

- Alo, C.A. y Pontius, R.G.Jr. (2007). "Identifying systematic land cover transitions using remote sensing and GIS: the fate of forest inside and outside protected areas of Southwestern Ghana", *Environment and Planning B*, en prensa.
- Briassoulis, H. (1999). *Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modeling Approaches*, Regional Research Institute, West Virginia University., disponible en: <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm> (consultado en febrero de 2008).
- Burnicki, A.C., Brown, D.G. y Goovaerts, P. (2007). "Simulating error propagation in land-cover change analysis: the implications of temporal dependence", *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.31, pp. 282-302.
- Carrera Sánchez, M.C. y Chicharro, E. (2000). "Las grandes superficies comerciales: su relación con la red viaria orbital en la Comunidad de Madrid", *Lecturas geográficas. Homenaje a José Estébanez Álvarez*, Madrid, Editorial Complutense, pp. 1079-1094.
- Castro, R. y García-Abad, J. (1993). "Confección de Cartografía Dinámica de Ocupación del Suelo con SIG: Municipio de Brea del Tajo (Comunidad Autónoma de Madrid)", *2º Congreso de AESIG*, Madrid, pp. 375-392.
- Consejería de Medio Ambiente (1997). *Mapa de Vegetación y Usos del Suelo de la Comunidad Autónoma de Madrid*, disponible en (consultado en febrero de 2008): <http://medioambiente.comadrid.es/areastematicas/biodiversidad/vegetacion.html>
- García Ballesteros, A. y Sanz Berzal, B. (2002). *Atlas de la Comunidad de Madrid en el umbral del siglo XXI. Imagen socioeconómica de una región receptora de inmigrantes*. Madrid, Universidad Complutense y Dirección General de Economía y Planificación de la Consejería de Economía e Innovación Tecnológica de la Comunidad de Madrid, Editorial Complutense, D.L.
- García Palomares, J.C. y Gutiérrez Puebla, J. (2007). "La ciudad dispersa: cambios recientes en los espacios residenciales de la Comunidad de Madrid" *Anales de Geografía*, vol. 27, nº 1, pp. 45-67.
- Gómez Deldago, M. y Barredo Cano, J. I. (2005). *SIG y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*, Madrid: RA-MA.
- Gutiérrez, S. (2002). "La evolución reciente de la población rural: ¿un episodio coyuntural o un verdadero cambio de tendencia?", *Actas del XI Coloquio de Geografía rural: los espacios rurales entre el hoy y el mañana*, pp. 359-368. AGE, Grupo de Geografía Rural. Santander, Universidad de Cantabria.
- Gutman, G., Janetos, A., Justice, C., Moran, E., Mustard, J., Rindfuss, R., Skole, D., Turner, B.L. y Cochrane, M., editores (2004). *Land Change Science. Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface* Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

- Lambin, E.F. y Geist, H.J., editores (2006). *Land Use, and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts*. Berlin, Springer.
- Leboreiro, A. (1999). “De la teoría a la práctica en la planificación territorial”, *Urban*, 3, pp. 68-79.
- López de Lucio, R. (2003). “Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid”, *Urban*, 8, pp. 124-161.
- López de Lucio, R. (2004). “Morfología y características de las nuevas periferias. Nueve paisajes residenciales en la región urbana de Madrid”, *Urban*, 9, pp. 56-80.
- Mayaux, Ph, Eva, H., Bink, A., Acheral, F. y Belward, A. (2008). “Remote Sensing of Land Cover and Land-Use Dynamics” en E. Chuvieco (Editor): *Earth Observation of Global Change. The Role of Stellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment*, Springer, pp. 85-108.
- OSE, Observatorio de la Sostenibilidad en España (2006). *Cambios de ocupación del suelo en España. Implicaciones para la sostenibilidad*. Alcalá de Henares, OSE.
- Otero, Isabel (1993). “Una aplicación del Pc ArcInfo al análisis del cambio paisajístico”. En: Asociación Española de Sistemas de Información Geográfica. 2º Congreso. *Los Sistemas de Información Geográfica en el umbral del siglo XXI*. Madrid. pp. 501-517
- Peña, J., Bonet, A., Bellot, J., Sánchez, J.R., Eisenhuth, D., Hallett, S. y Aledo, A. (2007). “Driving forces of land-use change in a cultural landscape of Spain”, en Koomen, E.; Stilwell, J.; Bakema, A. y Scholten, H.J. (Eds.). *Modelling land-use change. Progress and applications*, Dordrecht, Springer, Chapter 6, pp. 97-115.
- Pontius, R.G. Jr., Shusas, E. y McEchern, M. (2004). “Detecting important categorical land changes while accounting for persistente”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Vol.101, pp. 251-268.
- Sancho, J., Bosque, J., y Moreno, F. (1993). “La Dinámica del Paisaje: aplicaciones de un SIG raster al ejemplo de Arganda del rey en las vegas de Madrid”, *Catastro*, pp. 35-51.
- Santiago Rodríguez, E. de (2007). “Madrid, ‘ciudad única’. Pautas y lógicas espaciales recientes en la región madrileña”, *Urban*, nº 12, pp. 8-33.
- Serrano Cambroner, M., Gago García, C. y Antón Burgos, F.J. (2002). *Impacto territorial de las carreteras orbitales de la Comunidad de Madrid*. Madrid, Dirección General de Investigación, Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid.
- Zárate, A., Ojeda, L., Rebollo, J., Pérez, M., y de Pablo, C. (1998). “Cambios en el Paisaje de la Comunidad de Madrid”. pp. 213-228, en Arias, A. Fourneau, F. (eds.). *El paisaje mediterráneo*. Universidad de Granada – Junta de Andalucía.

Capítulo 3

Factors explaining land urban growth in Madrid region (Spain) between 1990-2000

Publicación:

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (**En revisión**). “Factors explaining land urban growth in Madrid region (Spain) between 1990-2000”, *The annals of Regional Science*.

RESUMEN

Hoy en día, el proceso de crecimiento urbano es un fenómeno muy complejo. Muchos factores socioeconómicos y biofísicos (accesibilidad, demográficos y las tendencias económicas, las políticas de uso del suelo, topografía, etc.) afectan los patrones de crecimiento de diferente manera. El análisis de dichos factores es una herramienta de gran utilidad para la ordenación y gestión del territorio. El objetivo de este trabajo es llevar a cabo un análisis de este tipo en la región de Madrid (España), considerando dos unidades espaciales diferentes de agregación de la información relativa a las variables de estudio. Para ello, se aplicaron cuatro diferentes métodos estadísticos considerando hasta 31 variables iniciales a nivel de píxel y municipio.

Los resultados obtenidos muestran que el uso de diferentes métodos estadísticos implementados con variables en diferentes unidades de observación hace más consistente la identificación de los principales factores que influyen en la localización de nuevas zonas urbanas. De este modo, se obtuvo que: la densidad y crecimiento de la población, la distancia al CDB, la distancia a las carreteras, la topografía; son los factores más influyentes en la localización de las nuevas zonas urbanas en la Comunidad de Madrid.

Palabras clave: Crecimiento urbano, Factores explicativos, Regresión Logística, Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales, Regresión Multinivel, Madrid.

ABSTRACT

Nowadays, the urban growth process is a very complex phenomenon. Many socio-economics and biophysical factors affect urban growth patterns in different ways (accessibility, demographic and economic tendencies, land use policies, topography, etc.). The analysis of the driving forces is a powerful tool for the land planning and management. The aim of this work is to carry out this analysis in Madrid region (Spain), taking into two different observational units to define the variables or factors. Accordingly, four different spatial statistical methods are applied to 31 initial variables at two observation levels: pixel and municipality.

The results obtained show that the use of different statistical methods implemented with variables in different observational units makes more consistent the identifying of the primary factors that influence the location of new urban zones. Thus, it was found that: population density and growth, the distance to the CBD, the distance to transportation systems, topography; are the more influential factors in the location of the new urban areas in Madrid region.

Keywords: Urban growth, Explaining factors, Logistic regression, Partial Least Squares regression, Multilevel model, Madrid region.

1. INTRODUCTION

Historically, city growth was caused by an increase in population. However, in present-day Europe, in places where demographic pressure is low or negligible, there are a variety of factors that cause land urban growth, such as the life styles in suburban environments (Antrop 2004). At the same time, land urban growth has accelerated in response to the relationship between the improvement in transport networks and citizen mobility. These changes mean it is now possible to live further away from the city, while maintaining access to core city employment, goods, or services, and it is possible to live in one city and work in another (EEA 2006). Other factors that affect growth patterns may include the means of transport, the price of the land, demographic tendencies, the appeal of the existing urban areas and, equally important, land use policies at local and regional scales (Antrop 2004).

The analysis of factors driving land urban growth will vary among cities and regions, but a clear understanding of them is required for successful land planning and growth management (Veldkamp and Lambin 2001; Verburg et al. 2004a; Overmars 2006). A careful analysis may provide regional planning managers a set of tools that may aid in developing sustainable cities while protecting the environment (Verburg et al. 2004b).

Usually, driving force is subdivided in three groups: socioeconomic, biophysical and proximate causes. Thus a number of researchers have considered population, GDP, employment, land for development, land use, natural protected areas, proximity to: roads, urban areas, rivers, BDC, shops, industries; slope, altitude and aspect, etc. variables as the main factors that drive changes in land use (Bocco et al. 2000; Hoshino 2001; Cheng and Masser 2003; Aspinall 2004; Verburg et al. 2004a; Conway 2005; Pan and Bilsborrow 2005; Overmars and Verburg 2006; Braimoh and Onishi 2007; Hu and Lo 2007; Yang et al. 2007; Serra et al. 2008).

Furthermore, to determine the relation between land use change and drivers factors have been used different statistical techniques, spatial and no spatial. The report 7 of the *Land Use and Cover Changes* (LUCC) series by Lesschen et al. (2005) provides a detailed description of the statistical and empirical techniques used for land use and land cover spatial analysis for the different cases of studies.

Also, with the extended use of the Geographical Information Technologies, recent analysis of land use change factors have mainly used pixels as observation units and have considered administrative units as the source of information.

In recent years, some have analysed explaining variables at administrative boundary levels, using multivariate analysis methods, such as: Multiple Lineal Regression (MLR) (Bocco et al. 2000; Kwan and Weber 2008; Lopez et al. 2001), Partial Least Squares Regression (PLS) (Yang et al. 2007) and Logistic Regression (LR) (Serra et al. 2008). Whereas others have analyzed the driving forces of land use change at pixel level, usually using Spatial Logistic Regression (Cheng and Masser 2003; Verburg et al. 2004a; Conway 2005; Hu and Lo 2007; Poelmas and Van Rompaey 2010).

It is clear that some variables like socioeconomic conditions of the population can only be obtained at certain administrative boundary levels. But others variables related with biophysical conditions (topography, for example) should be measured locally, because they change rapidly throughout the territory and a pixel-based unit may better capture this spatial variability.

It is very common that both levels in land use models are considered, in which the observation units are treated without distinction, i.e. factors are aggregated at municipal level or these are disaggregated at pixel level. However, this may lead to erroneous inferences about the driving forces of the land use changes. Therefore, when the study implies variables in more than one level observation is necessary to apply multilevel statistical analysis, which unit observation of each variable during the analysis is conserved.

However, very few researchers have used various levels of hierarchical data links in order to look for a relationship between explaining factors (Hoshino 2001; Verburg et al. 2004a; Pan and Bilborough 2005; Overmars and Verburg 2006).

Though, choose and apply correctly the best statistical method for studying the spatial behavior of land urban is not simple. However, to understand the processes that lead the land urban growth, from a spatial standpoint, a combination of methods can provide a better perspective, applied within a coherent theoretical framework (Lesschen et al. 2005). Considering the above mentioned, we intend to analysis the land urban growth in the Region of Madrid. This Region has undergone rapid land urban growth in the last 10

to 15 years. Between 1990 and 2000 over 30 000 ha have been urbanised, an almost 50% increase since 1990 (OSE 2006; Plata et al. 2009).

Thus, our primary objective was to analyze, through different statistical techniques, the factors that have driven this important land urban growth in Madrid region over the period mentioned. We compiled social, economic, and biophysical variables at pixel level (with size of 50 x 50 meters, in total are 3,210,160 pixels in the study area) and at municipal level (179 municipalities). These variables were compiled in both levels with the aim to determine if different statistical methods that work with different observation units could introduce differences identifying the driving forces of the land urban growth. In addition, the study is focused in the changes registered for four different land urban categories (*discontinuous urban fabric (DUF)*, *isolate residential areas (RA)*, *industrial and commercial units (ICU)* and *construction sites (CS)*) defined in Corine Land Cover database. These land urban categories have registered the greater increase between 1990 and 2000 (Plata et al. 2009). Thus, the last objective is determine if the driving forces are the same or not for the four different patterns of land urban growth.

2. METHODOLOGY

The use of different procedures allows validating the results obtained from several methods and providing higher accuracy of the conclusions reached. In this paper we have applied four statistical techniques. Two of them are well known and therefore are not going to be described in detail, except for those aspects that could facilitate or difficult its use with geographical data. However, the other two techniques are described in more detail, since their diffusion in the field of land use analysis is not still very common.

2.1. Techniques used to study explaining factors in land use change

One of the more common techniques in land change analysis is **multiple linear regression (MLR)**. This method has been used by a large number of researchers to explaining the land use changes. We use it to analyze urban land growth at municipal level. In this case, the variables selection was made using a stepwise forward procedure. The determination coefficient R^2 was used as estimator of goodness of fit. The absence of multicollinearity in the models was verified with the variance inflation factor (VIF)

and the Durbin-Watson statistic (DW) in order to verify potential problems of autocorrelation (Montgomery et al. 2006).

However, when this technique is applied to spatial variables, certain problems arise, due, that the model should to satisfy some hypothesis (normal distribution of variables, many observations, absence autocorrelation, etc.).

A technique that can help to reduce some of these problems is the **Partial Least Squares (PLS) regression** (Wold et al. 2001; Abdi 2003; Vega Vilca 2004; Alciaturi et al. 2003; Yang et al. 2007). This technique there has been more applied in other branches of science than in land use analysis (Fragkaki et al. 2004; Yang et al. 2007). However, certain attributes make PLS an interesting technique for analysing land use changes, primarily because PLS performs well with limited sample sizes and when variables are highly correlated.

In particular, PLS seeks a set of factors or latent variables that can adjust a simultaneous decomposition of X and Y as long as these factors can explain, in as much as possible, the covariance between X and Y (Vega Vilca 2004; Wold et al. 2001; Alciaturi et al. 2003). The next step is a regression, where the decomposition of X (matrix of factors) is used to adjust Y (Abdi 2003 and 2010; Yang et al. 2007). This formulation creates a PLS model as the representation of the X matrix in terms of the T factors according to the following equation:

$$X = T \cdot P^T + e$$

Accordingly, the matrix of X independent variables is expressed by the matrix of T factors with an e error which is determined according to the number of factors selected.

In turn, the relationship between Y independent variables and the T factors is established as:

$$Y = T \cdot B + f$$

where B are the factor coefficients, obtained in such a way as to minimise the f error.

There are several procedures, based on iterative processes, which determine the relationship between the factors $T = X \cdot W$ and the response Y variable (For more

information of these procedures see: Alciaturi et al. 2003; Abdi 2003 and 2010; Yang et al. 2007; and <http://www.statsoft.com/textbook/partial-least-squares/?button=2>).

With these results it is possible to obtain a PLS model by calculating the coefficient vector β_{PLS} using the following multiple linear regression model:

$$Y = X \cdot B_{PLS} + e$$

Therefore, if all factors are taken into account when the β_{PLS} coefficients are obtained, these can be compared with the coefficients derived from the β_{RLM} multiple linear regression model. Finally, the total quantity of variance explained by the models can be obtained from the R^2 coefficient.

Apart from this, the data obtained with high level of spatial detail, for instance each pixel in a GIS raster, require the use of other techniques. One of the most widely technique used to analyze binary data at pixel level is the **Logistic Regression (LR)** (Serneels and Lambin 2001; Cheng and Masser 2003; Munroe and Muller 2007; Conway 2005; Hu and Lo 2007; Serra et al. 2008).

This model was implemented in the Idrisi Andes GIS, considering a strategic spatial sampling of 10% (approximately 300,000 pixels) with a ratio close to 1:1 between urban and nonurban land use (Cheng and Masser 2003). This can be very helpful when there is a substantial amount of spatial autocorrelation in the underlying data (Munroe and Muller 2007). The validation of the LR models can be tested by the ROC statistic and by the percentage of pixels which are correctly classified (PCC1) (Pontius and Schenider 2001; Cheng and Masser 2003; Pontius and Batchu 2003).

Finally, there are techniques to study models more complex, with different observation units, known as **multilevel models**, which have been applied in recent research (Hoshino 2001; Verburg et al. 2004a; Pan and Bilsborrow 2005; Overmars and Verburg 2006; Kwan and Weber 2008). Adjustments in multilevel models are done first by fitting an empty model (the simplest model of variance decomposition) for the binary dependent variable of urban growth (1 growth, 0 other), which is referred to municipalities (group effects), without taking into account the explaining variables.

$$\log it(\pi_{ij}) = \log \left[\frac{\pi_{ij}}{1 - \pi_{ij}} \right] = \beta_0 + U_{0j}$$

Where: β_0 is the general intercept and U_{0j} is the random deviation of that average per j group.

Besides the general intercept, a new random term, known as U_{0j} , is introduced. The term U_{0j} is a group dependent intercept, an error term at the group level. With this random term the variation among groups is modelled explicitly including the effect of a member of a specific group.

Multilevel models also allow the variance of the dependent variable to be decomposed into two parts. The first part is attributed to the individual level (pixel) and the second variance attributed to the group level (municipality). This way the model is used to know whether the variance of the municipality level in the dependent variable is significant (Overmars and Verburg 2006).

In the next stage, the explaining variables at pixel level (level 1) and at municipality level (level 2) are added to an empty model, obtaining a binomial regression model with a random intercept:

$$\log it(\pi_{ij}) = \beta_{00} + \sum_{k=1}^k \beta_{k0} x_{kij} + \sum_{h=1}^H \beta_{h0} z_{hj} + U_{0j}$$

Where: x_{kij} are the k explaining variables at level 1 and z_{hj} are the h explaining variables at level 2. In this model the intercept varies randomly among groups. The interpretation of the regression coefficients is carried out by calculating the *odds ratio* ($\exp(\beta)$).

In order to indicate the proportion of variance that is accounted for by level 2, the intraclass correlation coefficient was used. This coefficient is expressed as:

$$\rho_R = \frac{\tau_0^2}{\tau_0^2 + \frac{\pi^2}{3}}$$

Where: τ_0^2 is the variance of the random intercept on a municipality level and $\frac{\pi^2}{3} = 3.29$ is the variance at pixel level (level 1) for the residuals of a logistic distribution (Snijders and Boxer 1999; Luke 2004; Gelman and Hill 2007).

2.2. Study area and available variables

The total size of Community of Madrid is 8025 km² (Fig. 1), and it holds a total of 179 municipalities. Its population is estimated to be approximately six million inhabitants in 2005 (INE, Instituto Nacional de Estadística <http://www.ine.es/inebase/>), most of which are concentrated in the Madrid metropolitan area. However, after the 90's there was an important urban expansion, due to a decentralization process, primarily in municipalities of the west, north and southeast of the metropolitan area.

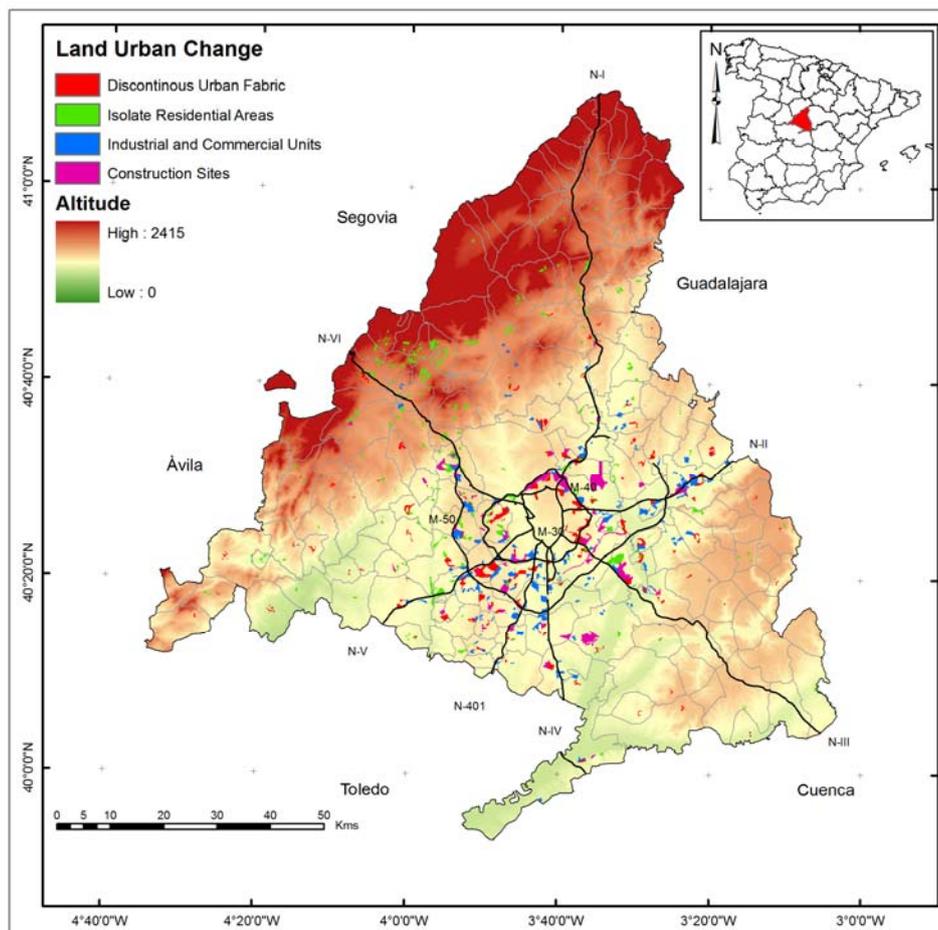


Figure 1. The Autonomous Community of Madrid and the distribution of the new artificial zones which emerged between 1990 and 2000.

Fuente. Elaboración propia a partir del CLC1990 y 2000. Instituto Geográfico Nacional, España

The spatial distribution of the industrial and commercial sectors is each time more broad, disperses and fragmented. This has led to a growing demand of transportation for workers and especially for goods (López de Lucio 2003; Gutierrez Puebla 2004; Santiago Rodriguez 2007). Consequently, there was a significant expansion of transport infrastructure. While this growth in development and infrastructure has threatened both environmental and social sustainability, urban planning forecasts indicate that dispersed growth will continue in the future (Gutierrez Puebla 2004).

Nowadays, the region of Madrid is considered one of the most dynamic territories in the Mediterranean countries, and the fifth metropolitan polycentric area in Europe. Artificial surfaces in this region have grown approximately 48% during the 90's, which is far from the 25% average national growth or the 5.4 % in the European Union (EEA 2006; OSE 2006). This growth has outpaced population growth, which was only 9% in the same time period. As a result, residential zones have increased 14 310 ha, of which 80 % correspond to discontinuous urban areas which are composed in near equal proportions of *discontinuous urban fabric (DUF)* and *isolate residential areas (RA)* around the edge of urban district centres or in rural areas. In addition, *industrial and commercial units (ICU)* have also expanded significantly, with an increase of 7 007 ha, a 118 % increase over this 1990-2000 study period. The same applies to *construction sites (CS)* which had a 6 331 ha increase (Fig. 1) (Plata et al. 2009). In the study cited above, these four categories had the most significant increase for urban categories, so it will be considered as dependent variables in the present study.

In the case of Madrid region there is a wide diversity of general factors that may influence land use change, especially for urban growth. A total of 31 socio-economic, political, planning, closeness/accessibility and biophysical variables were finally collected and determined as the explanatory variables for 1990, the reference year (Table 1). The selection of the variables was based on the literature review, taking into account previous studies of Madrid region and, in particular, data availability. This information was extracted from different Spanish sources.

Table 1. Description of dependent and independent variables measured in each municipality (Reference year: 1990).

| Variable type and observation units | Variable name | Description |
|--|-----------------|---|
| Growth in urban zones (% at municipal level for the MLR y PLS models, and at pixel level for LR (binary map)). | DUF | Increase: in the category <i>discontinuous urban fabric</i> , 1990 and 2000 |
| | RA | in the category <i>isolate residential areas</i> , 1990 and 2000). |
| | ICU | in the category <i>industrial and commercial units</i> , 1990 and 2000. |
| | CS | in the category <i>construction sites</i> 1990 and 2000. |
| | G4 | in the 4 previous, 1990 and 2000. |
| Socio-economic (Municipal level) | IncPop | in population |
| | IncEmp | in employment |
| | IncNunHou | in number of houses (%) |
| | IncGrossRent | in gross rent (%) |
| | PopDens | Population density |
| | RoadDens | Road density (all) |
| | DensRegRoads | Density of regional roads and highways |
| Planning (Municipal level) | MunBuildLand | Percentage: of municipal building land |
| | MunNonBuildLand | of municipal non-building land ¹ |
| Political (Municipal level) | VoteLeft | of votes for left-wing parties in 1995 ² |
| | TownLeft | Town halls which are potentially governed by left-wing parties ³ |
| Closeness/ Accessibility (Average at municipal level for the MLR y PLS models, and at pixel level for LR (continuous maps)). | DistRoads | Distance: to roads |
| | DistRegRoads | to regional roads and highways |
| | DistHosp | to hospitals |
| | DistMalls | to malls |
| | DistUniv | to universities |
| | DistUnWantedFac | to unwanted facilities |
| | DistForest | to forests |
| | DistWater | to watercourses |
| | DistNaturAreas | to preserved natural areas |
| | DistCBD | to the CBD of Madrid |
| DistUrban | to urban areas | |
| Biophysical (% at municipal level for the MLR y PLS models, and at pixel level for LR (continuous maps)). | ViewForest | Pixels: in the viewshed of forests |
| | VieWetlands | in the viewshed of wetlands |
| | NaturAreas | in preserved natural areas |
| | View NaturAreas | in the viewshed of preserved areas |
| | Aspect | with a south south-western aspect |
| | slope | Ground slope |
| | altitude | Digital elevation model |

Note: Slope and Altitude are grouped into ranges to analyzed on a municipal level (slope<3% and slope between 3 y 6%; altitude between (0-800m., 801-1000m. and 1001-1200m).

3. RESULTS

3.1. Quantitative analysis of urban growth using: MLR, PLS and LR

First of all, the values of the Durbin Watson (between 1.72 and 2.15) coefficient and the inflation factor of variance (between 1.41 and 2.9) obtained, can rule out autocorrelation and multicollinearity problems in the MLR models.

In addition, the goodness of fit of the MLR models is between 53 and 73 % of the variability of data, while those obtained by PLS explain around 58 and 78 %. Also in the logistic regression models are obtained ROC values greater than 91 % and percentage of pixels correctly classified between 88 and 97 %. Likewise, the

standardized coefficients were obtained in order to assess in a homogeneous way the explanation of each variable in the different models (Table 2).

Table 2. Results of the MLR, PLS and LRE models (standardized coefficients)

| Variables ^b | DUF | | | RA | | | ICU | | | CS | | | G4 | | |
|------------------------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| | MLR | PLS | LR |
| PopDens | 0.36 | 0.22 | 0.10 | 0.14 | 0.17 | 0.12 | 0.42 | 0.31 | -0.05 | 0.35 | 0.36 | -0.03 | 0.28 | 0.26 | 0.04 |
| IncPop | | | | 0.24 | 0.26 | 0.10 | | | | | | | 0.14 | 0.14 | 0.01 |
| IncNunHou | 0.13 | 0.15 | 0.12 | | -0.09 | -0.04 | | | | | 0.09 | 0.07 | | | |
| IncGrossRent | -0.01 | | -0.01 | 0.13 | 0.05 | 0.05 | | | | | | | | | |
| DensRegRoads | | | | | | | | | | | | | 0.12 | 0.10 | 0.07 |
| MunBuildLand | | 0.11 | | 0.33 | 0.26 | 0.13 | 0.12 | 0.05 | -0.04 | 0.26 | 0.30 | 0.06 | 0.17 | 0.14 | 0.08 |
| MunNonBuildLand | | | | | | | | -0.05 | -0.03 | -0.12 | | -0.13 | -0.08 | | -0.03 |
| TownLeft | 0.12 | 0.16 | 0.12 | | | | 0.14 | 0.21 | 0.11 | | | | | | |
| DistUrban | | | -1.79 | | | -0.66 | | | -0.29 | | | -0.26 | | | -0.39 |
| DistHosp | | -0.34 | -0.24 | | -0.17 | | | -0.12 | | | 0.13 | | -0.28 | -0.46 | -0.08 |
| DistMalls | | 0.76 | 0.32 | | -0.21 | -0.47 | | -0.29 | -0.28 | 0.77 | 1.19 | 0.17 | | 0.16 | 0.15 |
| DistUniv | | 0.55 | 0.26 | | 0.37 | 0.26 | | | -0.26 | | -0.11 | 0.27 | 0.42 | 0.63 | 0.23 |
| DistUnwantedFac | | -0.14 | | | 0.12 | | | -0.23 | | | 0.24 | | | -0.16 | |
| DistRoad | | | -0.41 | | -0.26 | -0.18 | | | -0.34 | | -0.12 | -0.30 | -0.28 | -0.10 | -0.25 |
| DistForest | | | | -0.12 | -0.07 | | | | | | | | | | |
| DistWater | -0.19 | -0.14 | 0.11 | | | | | | | | | | -0.10 | -0.10 | -0.01 |
| DistNaturAreas | | | | | | | -0.16 | -0.07 | -0.01 | | | | | | |
| DistCBD | -0.45 | -1.37 | -0.76 | | -0.18 | | -0.12 | 0.10 | -0.06 | -0.99 | -1.48 | -1.11 | -0.61 | -0.75 | -0.65 |
| %NaturAreas | -0.14 | -0.08 | -0.05 | 0.32 | 0.25 | | | | | | | | 0.11 | 0.14 | -0.03 |
| %slope<3 | | 0.19 | -0.04 | | -0.11 | -0.09 | 0.25 | 0.21 | -0.22 | | | | | 0.12 | |
| %Altitude 801-1000 | | | -0.22 | | | | -0.09 | -0.05 | -0.17 | | | -0.27 | | | |
| R² | 0.51 | 0.58 | | 0.42 | 0.55 | | 0.65 | 0.73 | | 0.53 | 0.59 | | 0.73 | 0.78 | |
| ROC | | | 0.97 | | | 0.91 | | | 0.94 | | | 0.94 | | | 0.92 |
| PPCC1 | | | 95.3 | | | 88.2 | | | 91.5 | | | 93.7 | | | 96.9 |

^a In the third column, of each model, shows the results at pixel level.

^b Variables are collected at municipal level for the MLR and PLS models and at pixel level for LR model.

Looking into each of the models separately, it is worth noting that accessibility variables are the most predominant in the *Discontinuous Urban Fabric (DUF)* model. According to the MLR model, the municipalities with the highest DUF increases were, in order of importance, those closest to the city of Madrid, the ones with a highest population density and those with the shortest average distance to waterways.

In addition, the PLS model also includes distance to commercial zones, universities and hospitals with relevant correlations in the growth of this category. Also, the slope under 3% conditions the location of this urban category to municipalities with gentle slopes, logical from a building construction standpoint.

The model for the growth of the *isolate Residential Areas* category (**RA**) is that explains the lowest percentage in data variability (MLR = 42 %, PLS = 55 % and LR = 91%). In this case, there is a greater weight from the socioeconomic and planning variables,

although the variables related to the closeness to natural environments also play an important role. Indeed, according to the initial description of the urban growth in the region, this type of development had a larger growth in mountainous municipalities, close to forests and with major natural resources. Therefore, the intrinsic appeal of these sites had a bearing on this type of development. Similarly shown in the PLS model, where besides shown the accessibility to transportation systems and basic services are determinant location factors.

Among all the separate categories, the model for the growth of the *Industrial and Commercial Units* category (**ICU**) reached the highest percentage in explaining the variability of data (MLR = 65 % and PLS = 73 %). In this case, it is worth noting the incorporation of two variables related with the topography, and therefore the cost of adapting each site to development. The results also show that municipalities potentially governed by the two main left-wing parties have a positive influence on the development of new commercial and industrial zones. In summary, according to the variables that show the highest standardised coefficients, this model shows that the growth for ICU is mainly determined by the presence of a high population density, moderate slopes (< 3%) and closeness to preserved natural land. Also, the *PLS* model most important variables are road density and distance to shops and unwanted facilities.

In the case of *Construction Sites* (**CS**), the model shows again that the distance to the CBD together with the population density determine the emergence of new developed zones. It is nonetheless interesting to highlight that the distance to malls in 1990 takes on a second place. Its interest lies in how it reveals the importance that malls have in land use dynamics of this region. Also, PLS model quantifies a negative correlation with distance to roads. This means that the newly developed zones were located in areas with the best accessibility.

Finally, the model for the sum of the four categories of urban growth (**G4**) showed better results since it included ten independent variables. Given that the context is more general, it was possible to include other variables that were traditionally related to urban growth, such as the average distance or the average density of main roads in the municipality. The results show that both population growth and density are influential factors in urban growth, and so are the accessibility to hospitals, roads and CBDs.

Also, the results for the model sum of the four categories has many similarities with the variables selected in the MLR and PLS, mainly because taking the four categories as a whole increases the number of cases analyzed, it means, municipalities that have growth values in artificial surfaces.

In summary, the application of the three methods makes more consistent the analysis and shows that such methods are complementary. In this regard, the figures 2a, 2b, 2c, 2d and 2d shows a comparison of the variables selected by the multiple linear regression (MLR) models and their corresponding variables for the partial least square regression (PLS) and logistic regression models (LR).

This graph shows that the best fitting are those for: *isolate residential areas* (Fig. 2b), *construction sites* (Fig. 2d) and for the four grouped categories (Fig. 2e).

The coefficient values of the model fit to *discontinuous urban fabric* shows a good adjustment, except in the distance to hydrography. In this case, although both models (MLR and PLS) have a negative sign, in the LR model has a positive value. One possible reason could be the fact that the distance average to hydrography depends by the size of the municipalities (Fig. 2a).

In addition, the coefficients of the variables selected for the model, which was adjusted to industrial and commercial units, are quite similar using both methods (Fig. 2c). However, the distance to the CBD variable shows the opposite sign in the PLS model. This happens because in MLR model a set of variables is eliminated during the adjustment, whereas the other models adjust without the elimination of variables. Also, the population density, municipal building land and slope variables show opposite signs in LR model. This clearly must be related with the observation unit of the variables. Whereas in MLR and PLS models it is considered to these variables at municipal level, in LR are measured to pixel level.

These problems also have been observed in the model for the sum of the four categories of urban growth (**G4**). Specifically, the population density and preserved areas (Fig. 2e).

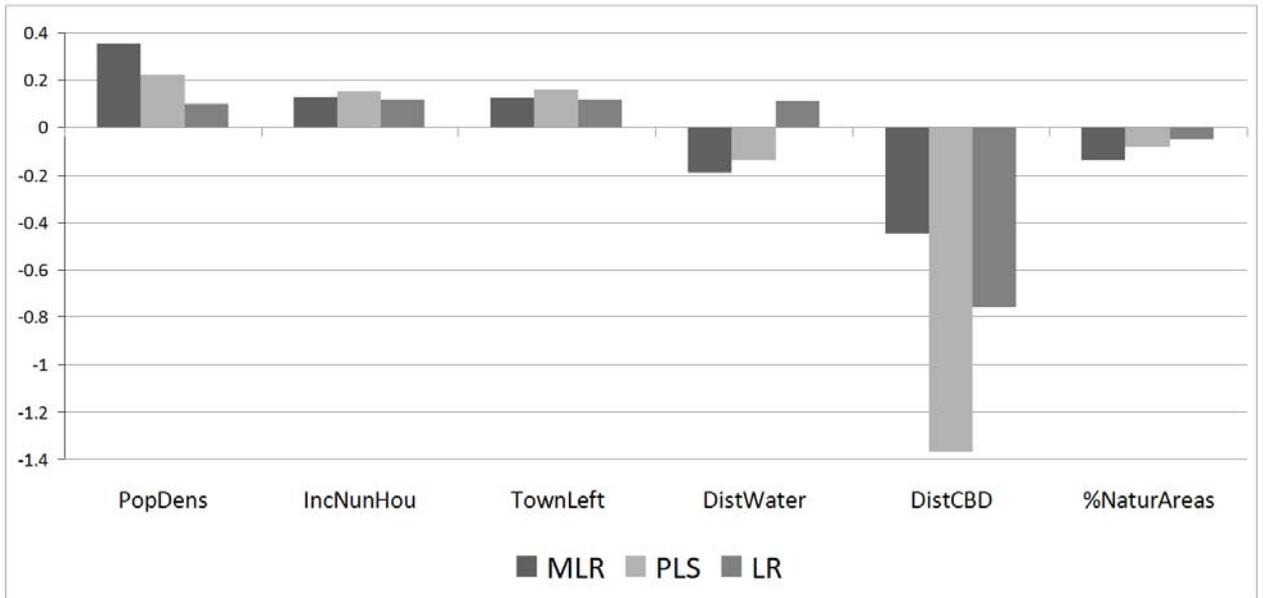


Figure 2a. Comparison for DUF

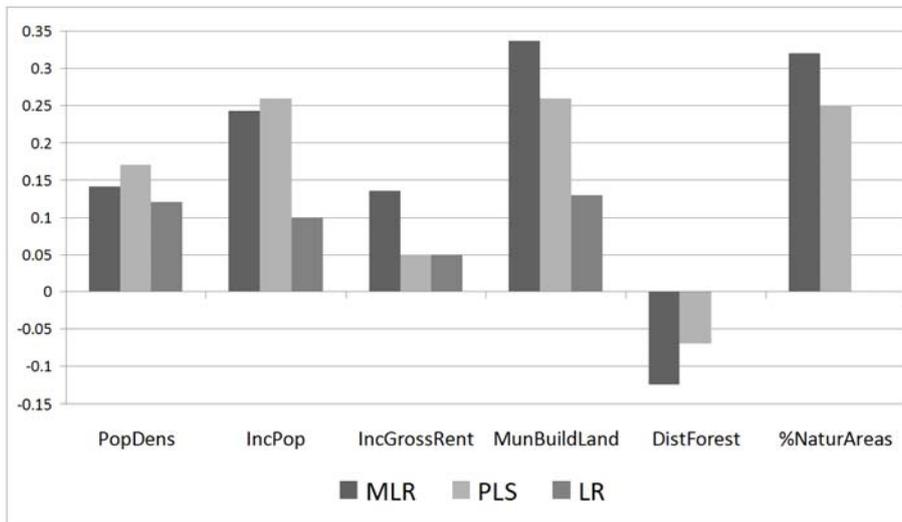


Figure 2b. Comparison for RA

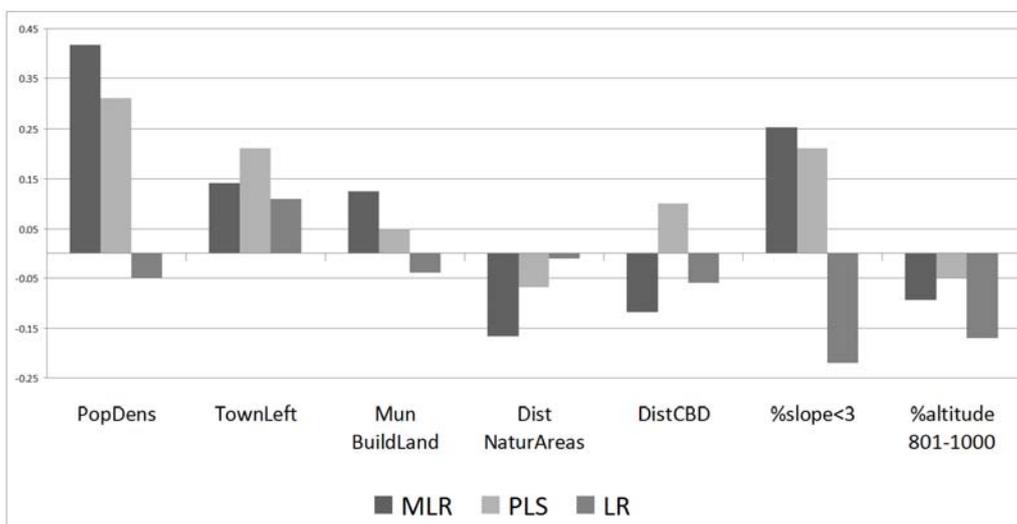


Figure 2c. Comparison for ICU

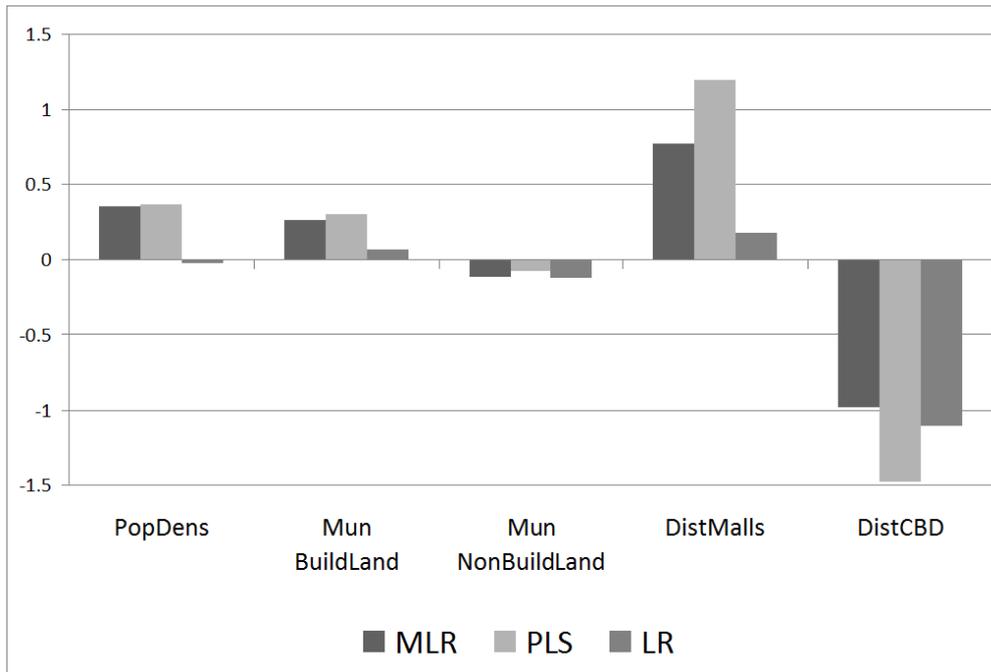


Figure 2d. Comparison for CS

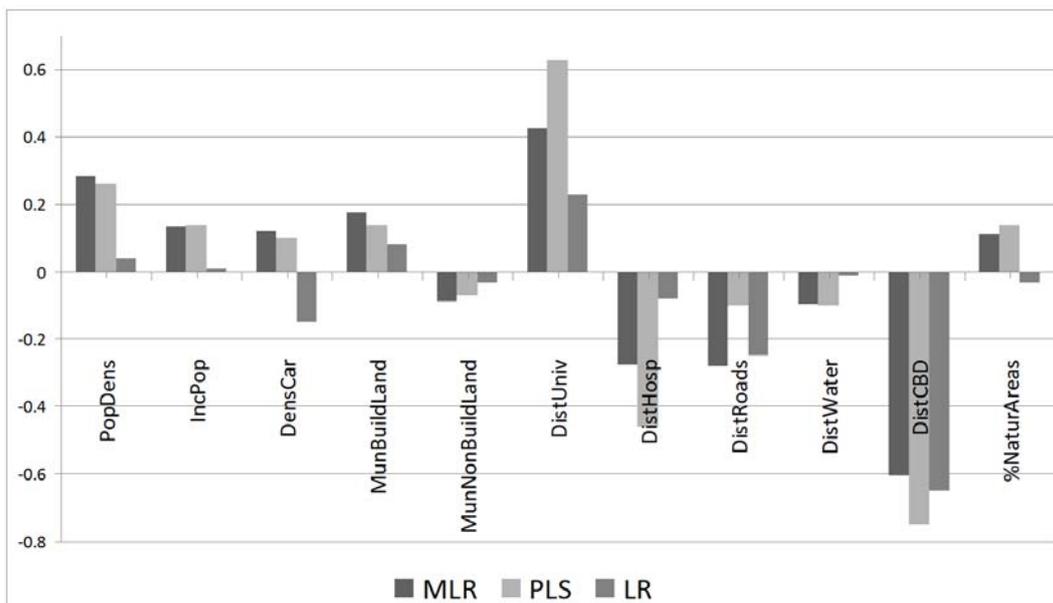


Figure 2e. Comparison for the four grouped categories

3.2. Probability of urban growth using explicative variables

One of the contributions of the logistic regression is based on the possibility of obtaining the probability of urban growth according to the different factors (see Fig. 3).

In general terms, the results show that the probability development of new urban zones increases when the distances to roads and urban zones are shorter, slopes and altitudes are low and the population density is high.

In particular terms, from the results obtained at pixel level, it was found that variables such as the closeness to urban zones that existed in 1990 (Fig. 3a), the distance to roads (Fig. 3b), slope (Fig. 3c) and altitude (Fig. 3d) are the factors that determine, to a certain point, the location of new urban zones.

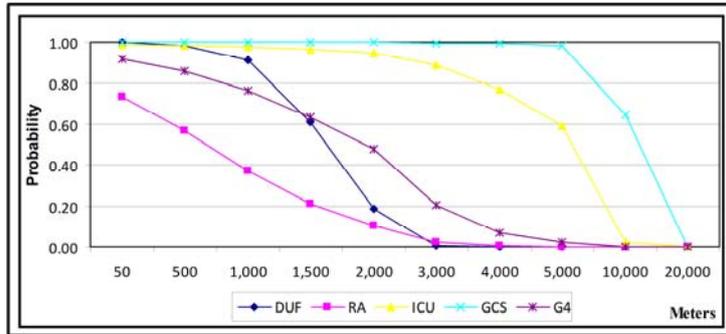


Figure 3a. Distance to urban zones

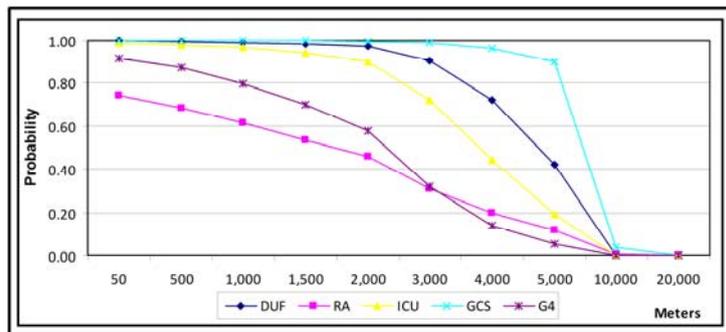


Figure 3b. Distance to roads

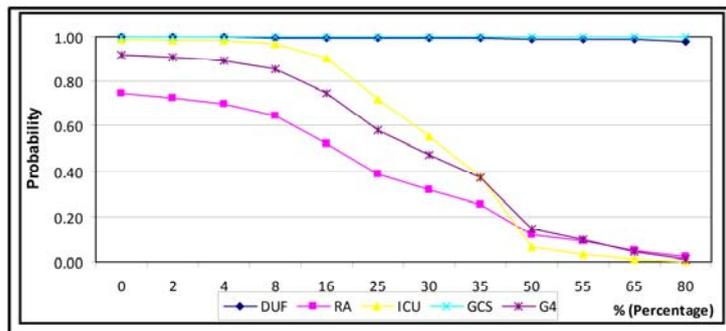


Figure 3c. Slope in the terrain

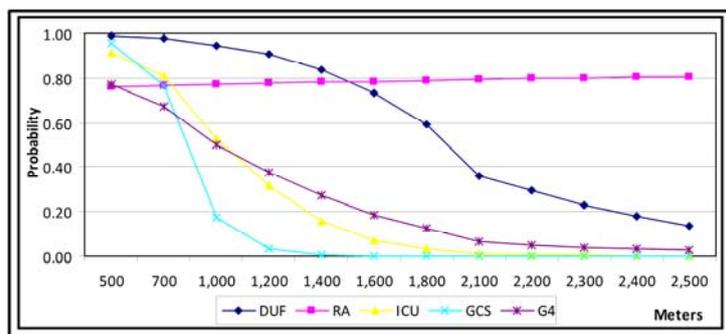


Figure 3d. Terrain altitude

3.3. A study of the factors that influence urban growth using a Multilevel Model (Empty Model and Random Intercept Model)

The analysis of this model was done with the software MLwiN (Rasbash et al. 2009).

Table 3 shows the results of two multilevel models adjusted: 1) empty model (model 1); and 2) model with all the variables at level 1 and 2 (model 2).

Table 3. Results of the multilevel logistic regression models

| | Variables | Model 1 | Model 2 |
|--------------------------|--------------------------|---------|------------|
| Level | Fixed effects | | |
| | Intercept | 1.374 | 2.154 |
| Level 1. Pixel | DistUrban | | -0.0013 * |
| | DistRoads | | -0.001 * |
| | DistWater | | 0.00013 * |
| | ViewForest | | 0.444 ** |
| | VieWetlands | | -0.456 -- |
| | NaturAreas | | 0.004 -- |
| | View NaturAreas | | 0.353 -- |
| | Aspect | | 0.071 -- |
| | Slope | | -0.080 ** |
| | Altitude | | -0.003 * |
| Level 2. Municipality | PopDens | | 0.0005 * |
| | IncNumHou | | -0.002 -- |
| | IncGrossRent | | 0.060 * |
| | RoadsDens | | -0.0001 * |
| | MunBuildLand | | 0.026 ** |
| | MunNonBuildLand | | -0.0005 -- |
| | TownLeft | | 0.601 ** |
| | Random effects | | |
| | $Var(U_{0j}) = \tau_0^2$ | 1.097** | 0.729** |
| | ρ_R | 0.25 | 0.18 |

Results show that the variance at level 2 was significant for the two models ($p < 0.05$). In addition, the intraclass correlation coefficient (ρ_R) for the empty model (model 1) shows that 25 % of the variability is attributed to level 2 (municipalities). This variability in the model may be caused, for example, by differences in social-demographic changes on a municipal level (a growth of population, housing, communications, industries, shops, etc.). In principle, such variability could be accounted for by some explanatory variables on a municipal level. In this respect, model 2 was built including all the explanatory variables at level 1 (pixel) and level 2 (municipality), which had a certain degree of explanation on previous models.

In level 2, the random part tends to be smaller than in the empty model ($\rho_R = 18\%$). Therefore, these variables explain only 7% of the variability that was detected in empty model ($\rho_R = 25\%$).

Although significant variables were observed at both levels, the intraclass correlation coefficient does not show that the new variables can explain the all variability detected in models 1.

The previous thing perhaps must to two causes. The first cause may lie in the size of the territory, where the dependent variable (new urban growth) has a diffuse and irregular distribution, and in some municipalities it may be null.

The second cause could be the absence of an intermediate level between the pixel level and the municipality level. This intermediate level would define more clearly and in more detail the hierarchy in decision making within the urban environment, for instance, a land plot included inside a property development. Surely, at that level of spatial hierarchy there are explaining variables that are working but may not have been taken into account, for example, land purchase price.

On the other hand, this model continues showing the importance of some variables ($p < 0,05$) in the explanation of the urban growth, such as: the distance to urban, roads, watercourses, altitude, population density, increase of the gross rent and the roads density; and others with smaller degree of significance ($p < 0,10$) as the slope and the percentage of municipal building. Also, the model excludes variable that in the previous models had been significant like increase in number of houses and the percentage of municipal non-building.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The quantitative analysis of land urban growth in Madrid region, involves an analysis of large number of variables, including socio-economic, biophysical, related to accessibility, and others. These variables are defined in different observational units: socio-economic variables use municipal limits as an observation unit, but in the case of biophysical and distance variables, the observation unit is determined by the pixel size. In order to deal with such complexity, different statistical analysis methods have been developed.

Accordingly, a multiple linear regression analysis was carried out, based on municipal boundaries of Madrid region. One of the main problems encountered in this section was how to incorporate data to avoid, to the extent possible, the loss of information, errors in the results, as well as the so-called ecological fallacy (Snijders and Bosker 1999; Serra et al. 2008). In addition, the presence of multicollinearity and autocorrelation in the models resulted in the exclusion of a large number of variables, which may have been determinant in explaining urban growth. Thus, of the 31 initial variables, the best model only selected 12 variables. Another cause for variable exclusion was absence of normal distributions in the variables and also due to the small number of cases (179 municipalities). Nevertheless, the results which were obtained are helpful for finding a quantitative explanation to urban growth, even more when detailed categories of urban land uses are taking into account (for example, *construction sites* or *isolate residential areas*).

An alternative to the problems encountered during the data processing, was to use the partial least squares method (PLS), which can work with (1) highly correlated variables, (2) a small number of cases and (3) is more tolerant with normality assumption of variables. Consequently, the PLS method rendered another set of explanatory variables which had been excluded in the MLR method, and allowed the MLR to be validated in terms of variable selection.

In the other hand, the spatial logistic regression applied on a pixel level produced more consistent models and the determinant factors for the localization of urban growth were more unbiased and easier to interpret.

As mentioned, in this analysis there are a set of variables on a municipal level and on a pixel level, each with distinct information associated with each level. This led to the use of multilevel regression models, since models fit at one level (municipal or pixel), without taking into account the hierarchical structure of the data, may result in biased regression coefficients, erroneous inferences, discarding valid initial hypothesis, and improper variable exclusions from the models. The use of the multilevel models could solve some of these problems, shedding light on the distribution of data variability and provide additional information on variable behaviour at the level of the municipality. The results also confirm the hypothesis that decisions that are taken on a municipal level play an important role in land urban growth. In fact the multilevel analysis showed

that 25 % of the variability in the information occurs on a municipal level. In this case only a model with a random intercept was applied, but maybe models with a random slope could be more helpful to detect data variability at level 2, because the variables included at that level only explain the 8% of data variability. The 17% of the remaining variability is not explained by the model and this could be related to other variables at a municipal level that are currently unknown. Therefore it would require additional information or research on the causes, process, behaviour and interaction of these variables at different level.

Summarizing, the contribution of this study has been to integrate a considerable number of explanatory factors using four methods of spatial statistical analysis of land urban growth, at two observation levels: pixel and municipality. The results obtained show that the methods used are a powerful tool for identifying the primary factors that influence the location of new urban zones in Madrid. Important variables include, population density and growth, the average distance to the CBD, the average distance to transportation systems, terrain altitude and slope, or the percentage of building land.

5. ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by two sources:

- Consejería de Educación of the Madrid Community and the University of Alcalá via the project: *Crecimiento urbano y sostenibilidad en la Comunidad de Madrid. Una aproximación a los factores explicativos de los cambios recientes de usos del suelo* (CCG06-UAH/HUM-0670).
- Ministerio de educación y ciencia of Spain via the Project: *Elaboración de modelos de simulación normativos del crecimiento urbano actual* (SEJ2007-66608-C04-01).

6. REFERENCES

- Abdi H (2003) Partial Least Squares (PLS) Regression. In: Lewis-Beck M, Bryman A, Futing T (ed) *Encycl Soc Sci Res Methods*. Thousand Oaks (CA), Sage Publications, pp 792-795
- Abdi H (2010) Partial Least Squares Regression and projection on latent structure regression (PLS Regression). *Comput Stat* 2:97-106

- Alciaturi CE, Escobar ME, De La Cruz C, Rincon C (2003) La regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) y su aplicación al análisis del carbón mineral. *Rev Tec of the Faculty of Engineering of the University of Zulia* 26:197-204
- Antrop M (2004) Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landsc urban plan* 67:9-26
- Aspinall R (2004) Modelling land use change with generalized linear models – a multi-model analysis of change between 1860 and 2000 in Gallatin Valley, Montana. *J. Environ. Manag* 72:91-103
- Bocco G, Mendoza M, Masera O (2000) La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investig Geogr* 44:18-38
- Braimoh AK, Onishi T (2007) Spatial determinants of urban land use change in Lagos, Nigeria. *Land Use Policy* 24:502-515
- Cheng J, Masser I (2003) Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China. *Landsc Urban Plan* 62:199-217
- Conway Tenley M (2005) Current and future patterns of land-use change in the coastal zone of New Jersey. *Environ Plan B: Plan Des* 32:877-893
- EEA (2006) Urban sprawl in Europe, the ignored challenge. Report 10 European Environment Agency Copenhagen
- Fragkaki AG, Koupparis MA, Georgakopoulos CG (2004) Quantitative structure–retention relationship study of α -, β_1 -, and β_2 - agonists using multiple linear regression and partial least-squares procedures. *Anal Chim Acta* 512:165–171
- Gelman A, Hill J (2007) *Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models*. Cambridge University Press
- Gutiérrez Puebla J (2004) Producción de suelo industrial en la Comunidad de Madrid. *An Geogr of the University Complutense* 24:169-192
- Hoshino S (2001) Multilevel modeling on farmland distribution in Japan. *Land Use Policy* 18:75-90
- Hu Z, Lo CP (2007) Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Comput Environ Urban Syst* 31:667–688
- Kwan M, Weber J (2008) Scale and accessibility: Implications for the analysis of land use–travel interaction. *Appl Geogr* 28:110–123
- Lesschen JP, Verburg PH, Staal SJ (2005) Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems. *LUCC Report Series 7* Wageningen University of the Netherlands
- López de Lucio R (2003) Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid. *Urban* 8:124-161
-

- López E, Bocco G, Mendoza M, Duhau E (2001) Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. A case in Morelia city, Mexico. *Landsc Urban Plan* 55:271–285
- Luke DA (2004) *Multilevel Modelling*. SAGE Publications, London
- Menard S (2002) *Applied logistic regression analysis*. 2nd edn. SAGE Publications, London
- Montgomery D, Peck EA, Vining GG (2006) *Introduction to linear regression analysis*. 3rd edn. John Wiley New York
- Munroe DK, Muller D (2007) Issues in spatially explicit statistical land-use/cover change (LUCC) models: Examples from western Honduras and the Central Highlands of Vietnam. *Land Use Policy* 24:521-530
- OSE (Observatorio para la Sostenibilidad en España) (2006) *Cambios de ocupación del suelo en España. Implicaciones para la sostenibilidad*. Artes Gráficas Cuestas S. A. Alcalá de Henares, Madrid
- Overmars KP (2006) *Linking process and pattern of land use change: illustrated with a case study in San Mariano, Isabela, Philippines*. Dissertation, Leiden University
- Overmars KP, Verburg PH (2006) Multilevel modelling of land use from field to village level in the Philippines. *Agric Syst* 89:435–456
- Pan W, Bilsborrow R (2005) The use of a multilevel statistical model to analyze factors influencing land use: a study of the Ecuadorian Amazon. *Glob Planet Chang* 47:232– 252
- Plata Rocha W, Gómez Delgado M, Bosque Sendra J (2009) Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la comunidad de Madrid (1990-2000). *Scr Nova* 13. IOP Publishing PhysicsWeb. <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-293.htm>. Accessed 30 April 2010
- Poelmans L, Van Rompaey A (2010) Complexity and performance of urban expansion models. *Comput Environ Urban Syst* 34:17-27
- Pontius RG Jr, Batchu K (2003) Using the relative operating characteristic to quantify certainty in prediction of location of land cover change in India. *Trans GIS* 7:467-484
- Pontius RG Jr, Schneider LC (2001) Land cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agric Ecosyst Environ* 85:239–248
- Rasbash J, Steele F, Browne WJ, Goldstein H (2009) *A User's Guide to MLwiN*. Centre for Multilevel Modelling, University of Bristol, United Kingdom. IOP Publishing PhysicsWeb.
<http://www.cmm.bristol.ac.uk/MLwiN/download/MLwiN-userman-09.pdf>. Accessed 30 April 2010
-

- Santiago Rodríguez E (2007) Madrid, ciudad única. Pautas y lógicas espaciales recientes en la región madrileña: las grandes transformaciones estructurales; el despliegue del nuevo paradigma único en la región urbana de Madrid. *Urban* 12:8-33
- Serra P, Pons X, Sauri D (2008) Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors. *Appl Geogr* 28:189–209
- Serneels S, Lambin EF (2001) Proximate causes of land-use change in Narok District, Kenya: A spatial statistical model. *Agric Ecosyst Environ* 85:65–81
- Snijders T, Boxer R (1999) *Multilevel Analysis. An introduction to Basic and advanced multilevel modelling.* SAGE Publications, London
- Vega Vilca JC (2004) *Generalizaciones de mínimos cuadrados parciales con aplicación en clasificación supervisada.* Dissertation, University of Puerto Rico
- Veldkamp A, Lambin EF (2001) Predicting land-use change. *Agric Ecosyst Environ* 85:1–6
- Verburg PH, van Eck JR, de Nijs T, Dijst MJ, Schot PP (2004) Determinants of land-use change patterns in the Netherlands. *Environ Pla B: Plan Des* 31:125-150
- Verburg PH, Schot PP, Dijst MJ, Veldkamp A (2004) Land use change modelling: current practice and research priorities. *Geoj* 61:309-324
- Wold S, Trygg J, Berglund A, Antti H (2001) Some recent developments in PLS modelling. *Chemom Intell Lab Syst* 58:131–150
- Yang Z, Chenghu Z, Yongmin Z (2007) A partial least-squares regression approach to land use studies in the Suzhou-Wuxi-Changzhou region. *J Geogr Sci* 17:234-244

ANEXOS COMPLEMENTARIOS

Anexo 1

Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos y SIG

Publicación:

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2008). “Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos y SIG”, *XIII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, pp. 121-134, Las Palmas de Gran Canarias, España.

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis de los posibles factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid durante el período 1990-2000. Específicamente se analizan las categorías estructura urbana laxa, urbanizaciones exentas, zonas industriales y comerciales y zonas en construcción establecidas en la cartografía de usos del suelo Corine Land Cover. Como factores explicativos del cambio se tomaron variables socioeconómicas, biofísicas, de planificación legal, políticas y de proximidad/accesibilidad, espacializadas a nivel municipal. Por su parte el análisis entre las variables explicativas y el crecimiento urbano se llevó a cabo a través de técnicas estadísticas de regresión lineal múltiple y de mínimos cuadrados parciales. Los resultados obtenidos del ajuste de los modelos mostró la relevancia de algunas variables en la explicación de la localización del crecimiento de las zonas urbanas analizadas.

Palabras Clave: Crecimiento urbano, Variables explicativas, Regresión Lineal Múltiple, Regresión por Mínimos Cuadrados Parciales, Madrid.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the possible explanatory factors of the urban growth in the Community of Madrid during the period 1990-2000. Specifically the categories analyze urban lax structure, exempt urbanizations, industrial and commercial parks and zones in construction established in the cartography of uses of the soil Corine Land Cover. Since explanatory factors of the change took socioeconomic variables, biophysics, legal planning, political and proximity / accessibility, using municipal level. The analysis between the explanatory variables and the urban growth was carried out across statistical techniques of linear multiple regression and partial least squares analysis. The results obtained of the adjustment of the models showed the relevancy of some variables in the explanation of the location of the growth of the urban analyzed zones.

Keywords: Urban growth, Explaining factors, Partial Least Squares Regression, Multiple Linear Regression, Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente el crecimiento de las ciudades estaba determinado por el aumento de la población. Sin embargo, en la actualidad y en lugares donde hay poca o ninguna presión demográfica, existe otra variedad de factores que influyen en su crecimiento (EEA, 2006).

Esta dinámica de crecimiento urbano está provocando importantes cambios de usos del suelo, ocasionando como consecuencia una enorme presión sobre el territorio y sus recursos naturales, sobre la calidad de vida de las personas y sobre la sostenibilidad global del planeta (OSE, 2006). Es de gran importancia, por tanto, estudiar los patrones de crecimiento de las nuevas zonas urbanas y analizar los factores que inciden en el mismo a través del análisis espacial cuantitativo de las relaciones entre diversas variables (socioeconómicas, biofísicas, de accesibilidad, etc.).

En los últimos años se han desarrollado diversos estudios para establecer esa relación entre distintas variables de índole socioeconómico, biofísico y de accesibilidad y el crecimiento urbano, a partir de la aplicación de distintos métodos estadísticos (Bocco et al, 2000; Hoshino, 2001; Cheng y Masser, 2003; Verburg et al, 2004; Conway, 2005; Pan y Bilsborrow, 2005; Serra et al, 2005; Hu y Lo, 2007; Yang et al, 2007). Asimismo, Lesschen et al, (2005) en el informe número 7 del programa Land Use and land Cover Change (*LUCC*), proporciona una amplia descripción de técnicas estadísticas y empíricas utilizadas en el análisis espacial de cambios de usos y coberturas del suelo.

En general encontramos que una buena parte de estos estudios se realizan a nivel municipal o alguna delimitación a nivel regional, utilizándose predominantemente métodos de análisis multivariante (Yang et al, 2007; Serra et al, 2005; Bocco et al, 2000).

En este sentido la regresión lineal múltiple (RLM) es habitualmente utilizada como método para relacionar el cambio de un determinado uso del suelo y ciertas variables que pueden estar incidiendo en el mismo. Sin embargo, esta técnica requiere que se cumplan algunos requerimientos que no se adaptan a las características intrínsecas de la información espacial y que pueden limitar la implementación de este tipo de modelos.

La regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS por sus siglas en inglés) podemos decir que viene a paliar, en cierto modo, las limitantes presentadas por la RLM. Esta técnica es ampliamente aplicada en ciencias como la Quimiometría (Davies, 2001; Wold et al, 2001; Garimella et al, 2005). Sin embargo, hasta la actualidad no ha sido considerada ampliamente en investigaciones de ámbito territorial, aunque en los trabajos pioneros de Aguilera Aguilera y Garrido Frenich (2001) y Yang et al (2007) se han obtenido resultados bastante satisfactorios. Dicha técnica presenta propiedades interesantes para su aplicación con información geográfica, por mencionar algunas: a) las variables pueden y deben tener altos grados de correlación, y b) se puede ajustar los modelos con un mínimo de observaciones.

En resumen este trabajo tiene como objetivos determinar los factores que expliquen de forma cuantitativa la localización de las nuevas superficies artificiales en la Comunidad de Madrid, así como discutir la aplicación de dos métodos estadísticos (RLM y PLS) en el análisis del crecimiento urbano, utilizando como unidad espacial de observación el municipio.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

La Comunidad de Madrid se localiza en el centro de España y limita con las provincias de Guadalajara, Cuenca, Toledo, Ávila y Segovia (Figura 1). Se encuentra conformada por 179 municipios en una extensión territorial de 8.025 km². Su población estimada es de aproximadamente 6 millones de habitantes, gran parte de la cual se concentra en el área metropolitana, aunque a partir de la década de 1990 se evidenciaron fuertes procesos de descentralización hacia algunos municipios del oeste, norte y sureste de la región.

En este contexto la Comunidad de Madrid se consolida como uno de los territorios de mayor dinamismo del arco mediterráneo, con un crecimiento de las superficies artificiales aproximado del 48 % durante la década de los 90, muy por encima del 25% de crecimiento medio registrado en el territorio nacional y del 5,4% de la Unión Europea (EEA, 2006; OSE, 2006). En este sentido las zonas urbanas han aumentado en 14.310 ha, de las cuales el 80 % corresponde al tejido urbano discontinuo.

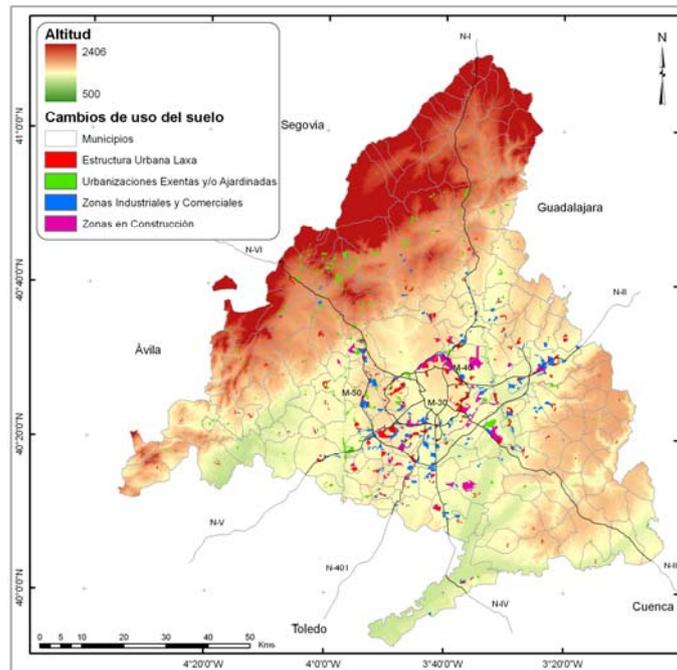


Figura 1. Crecimiento urbano en la Comunidad Autónoma de Madrid (1990-2000)
Fuente. Elaboración propia a partir del CLC1990 y 2000. Instituto Geográfico Nacional, España

La elección de las variables o factores explicativos de este fenómeno de expansión urbana se realizó tomando en consideración la literatura existente sobre este tipo de análisis y la disponibilidad de información de la región para llevarlo a cabo. De este modo, como variables explicativas, y tomando como referencia el año 1990, se recopiló información de hasta 31 variables diferentes de tipo socioeconómico, político, de planificación, proximidad/accesibilidad y de tipo biofísico (Tabla 1).

Las unidades de observación empleadas en este trabajo son los municipios madrileños. Las razones para utilizar este tipo de unidad de observación son las siguientes:

La dinámica de la ocupación del suelo (y más en concreto el crecimiento urbano) se puede suponer que responde, como mínimo, a dos tipos de influencias: en primer lugar las características físicas del terreno: seguramente, en un terreno muy elevado y con mucha pendiente, no es adecuado ni demasiado rentable la construcción de nuevas zonas residenciales. Este tipo de influencias se deben medir a un nivel de mucho detalle espacial ya que estas características pueden variar rápidamente en el territorio. Por ello, en la literatura sobre el tema es muy habitual encontrar estudios que emplean como unidad de observación el píxel, normalmente de un tamaño muy reducido y, por lo tanto, adecuado para observar estas variables explicativas.

Tabla 1. Descripción de las variables dependientes e independientes utilizadas en el ajuste del modelo. Todas las variables que miden crecimientos o cambios se refieren al periodo 1990-2000. Las variables que muestran un valor se refieren al año 1990.

| Tipo de Variable | Nombre de la variable | Descripción |
|------------------------------|----------------------------------|--|
| Crecimiento de zonas Urbanas | GEUL | Crecimiento de la categoría estructura urbana laxa (%) |
| | GUEA | Crecimiento de la categoría urbanizaciones exentas y/o ajardinadas (%) |
| | GZIC | Crecimiento de la categoría zonas industriales y comerciales (%) |
| | GZC | Crecimiento de la categoría zonas en construcción entre (%) |
| | G4 | Crecimiento de la categoría 4 categorías anteriores (%) |
| Socio-económicas | DensPob | Densidad de población (1990) |
| | CrecPob | Incremento Población |
| | CrecEmp | Incremento Empleos |
| | PIncrViv | Incremento de número de viviendas (%) |
| | PIncrRenBruta | Incremento de renta bruta (%) |
| | DensCar | Densidad de carreteras (todas) |
| | Denscarnaco | Densidad de carreteras Nacionales y regionales |
| Planificación | Purbaniza | Porcentaje de superficie urbanizable |
| | Pcom | Porcentaje de suelo no urbanizable común |
| Políticas | Pvotoizq | Porcentaje de votos obtenidos por los partidos de izquierda en 1995 ¹ |
| | Ayunizq | Ayuntamientos potencialmente gobernados por partidos de izquierda ² |
| Proximidad/ Accesibilidad | DMCar | Distancia Media a Carreteras |
| | DMcarnaco | Distancia media a carreteras Nacionales y regionales |
| | DMHosp | Distancia Media a Hospitales de referencia |
| | DMCom | Distancia Media a grandes superficies comerciales |
| | DMUniv | Distancia Media Universidades |
| | DMInstND | Distancia Media Instalaciones no deseables |
| | DMBosq | Distancia Media a Bosque |
| | DMHid | Distancia Media a hidrografía |
| | DMANatura | Distancia Media a áreas naturales protegidas |
| DistCentNeg | Distancia media al CBD de Madrid | |
| Biofísicas | PPCVBosq | % de píxeles en la cuenca visual de bosques |
| | PPCVHum | % de píxeles en la cuenca visual de humedales |
| | PPANatur | % de píxeles de espacios naturales protegidos |
| | PPCVANatur | % de píxeles en la cuenca visual de espacios naturales protegidos |
| | PPOSur | % de píxeles con orientación Sur-suroeste |
| | PPCPMe3 | % de píxeles con pendiente < 3% |
| | PPCPe3y6 | % de píxeles con pendiente entre 3 – 6% |
| | PPCAME800 | % de píxeles con altitud entre 0 – 800 metros. |
| | PPCAe801y1000 | % de píxeles con altitud entre 801 - 1000 metros. |
| | PPCAMa1201 | % de píxeles con altitud entre 1001- 1200 metros. |

¹ Porcentaje de votos a Izquierda Unida y PSOE

² Ayuntamientos en los que la suma de los votos a Izquierda Unida y PSOE supera el 45%.

Un segundo tipo de influencias sobre el crecimiento urbano son las características sociales y económicas y, también, los hechos legales y administrativos que inciden en donde es más rentable construir y donde es posible hacerlo desde el punto de vista legal. ¿En qué tipo de unidades espaciales es más adecuado medir este tipo de influencias explicativas del crecimiento urbano?, seguramente es razonable contestar que, en España, en los municipios. Estas divisiones administrativas tienen una dinámica económica peculiar y particular derivada de la existencia de un gobierno municipal que, con diversos procedimientos puede impulsar, en mayor o menor grado, el crecimiento económico y la construcción más o menos importante de nuevas zonas residenciales.

En este trabajo vamos a emplear este segundo tipo de unidades espaciales, de observaciones, pero, como se verá, en ellas vamos a medir no solo las variables sociales y legales que consideramos pertinentes, sino también las variables físicas, aunque estas últimas se miden de un modo bastante aproximado mediante valores promedio de todo el territorio municipal.

3. METODOLOGÍA

3.1. Regresión lineal múltiple

Se establecieron un total de 5 variables dependientes (las cuatro categorías mencionadas en el apartado anterior, ver figura 1, y una quinta resultado de sumar todas ellas, G4), expresadas como porcentaje de crecimiento respecto a la superficie total de cada municipio. Analizadas estas variables, se procedió a su normalización a través de una transformación logarítmica de la forma $\ln(y_i + 1)$ (Menard, 2002, p. 77; Montgomery et al, 2005, p. 156), debido a que una gran cantidad de municipios no presentaba valores de crecimiento urbano lo cual ocasionaba problemas de no normalidad de la distribución de frecuencias.

Una vez recopiladas todas las variables independientes se realizó un análisis de correlación, omitiendo una de cada dos que presentaban correlaciones bivariadas mayores de 0,8, con el fin de disminuir posibles problemas de multicolinealidad (Cheng y Masser, 2003; Bocco et al, 2000).

A continuación, se procedió al ajuste de 5 modelos de regresión lineal múltiple (uno para cada variable dependiente), introduciendo en cada uno de ellos un número de casos igual al total de municipios ($N = 179$). La presencia de multicolinealidad se certificó a través del índice de tolerancia y del factor de inflación de la varianza (FIV)³ y la autocorrelación con el estadístico de Durbin-Watson (DW)⁴.

Los modelos lineales de regresión múltiple tienen la siguiente forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_n \cdot X_n + u$$

Los coeficientes β_1, \dots, β_n muestran la magnitud del efecto que las variables explicativas X_1, \dots, X_n tienen sobre la variable explicada Y . El coeficiente β_0 es el término constante del modelo y u el término del error del modelo.

Como medida de calidad de ajuste del modelo se utilizó el coeficiente de determinación corregido \bar{R}^2 , de tal forma que cuanto mayor sea el coeficiente de determinación, mejor será el modelo.

3.2. Regresión por mínimos cuadrados parciales

Para salvar los inconvenientes que plantea el uso del RLM, se han desarrollado metodologías basadas en la eliminación de variables independientes (métodos de selección de variables), o basadas en la reducción de la dimensionalidad de las variables a través de factores o componentes principales.

Estas metodologías tienen problemas: las primeras podrían eliminar variables fundamentales para la explicación del cambio, mientras que en las segundas es posible que los componentes o factores seleccionados expliquen sustancialmente la variabilidad de las variables independientes X , pero eso no garantiza que sean relevantes al explicar la variable dependiente Y .

³ Índices de Tolerancia menores que 0,2 y FIV mayores a 5 son indicios de problemas de multicolinealidad; un Índices de Tolerancia menores a 0,1 y FIV mayores a 10 se manejan como posibles causas de multicolinealidad (Menard, 2002, p. 77).

⁴ Para detectar problemas de autocorrelación se puede adoptar la regla, no demasiado rigurosa, de que si $DW = 0$ hay autocorrelación perfecta positiva; si DW se aproxima a 2 no hay autocorrelación y si DW se aproxima a 4 hay autocorrelación perfecta negativa

La metodología PLS, busca un conjunto de factores o variables latentes que ajusten una descomposición simultánea de X y Y bajo la condición de que éstos expliquen tanto como sea posible la covarianza entre X y Y y que dicha descomposición sea eficaz para ajustar a Y (Alciaturi et al, 2005; Aguilera Aguilera y Garrido Frenich, 2001; Wold et al, 2001; Yang et al, 2007).

Básicamente, el modelo PLS se establece como una representación de la matriz X en términos de los factores T mediante la siguiente expresión:

$$X = T \cdot P^T + e$$

Siendo P^T la matriz transpuesta de P (pesos de los factores).

Y la relación entre las variables dependientes Y y los factores T se establece por:

$$Y = T \cdot b + f$$

Consecuentemente la matriz de variables independientes X queda expresada por la matriz de factores T con un error (e) determinado en función del número de factores seleccionados. No obstante, si el modelo incluye todos los factores resultantes de las combinaciones lineales el error sería cero ($e = 0$).

Asimismo los coeficientes de los factores b son obtenidos de modo que se minimice el error f .

Existen diferentes procedimientos, basados en procesos iterativos, para determinar la relación entre los factores T y la variable respuesta Y . Con ellos es posible obtener los coeficientes β_{PLS} a través del siguiente modelo de regresión lineal múltiple:

$$Y = X \cdot B_{PLS} + e .$$

Donde:

$$B_{PLS} = (P^T)^{-1} \cdot B \cdot C^T$$

Por consiguiente si se toman en cuenta todos los factores al obtener los coeficientes β_{PLS} , éstos pueden ser comparados con los coeficientes derivados del modelo de regresión lineal múltiple β_{RLM} . Es posible determinar la cantidad total de varianza explicada por los modelos a través del coeficiente R^2 .

4. RESULTADOS

4.1. Resultados de la RLM

Los resultados del ajuste de los 5 modelos de regresión múltiple se muestran en la figura 2 y la tabla 2. Para cada modelo sólo aparecen las variables que fueron finalmente seleccionadas a un 95% de confianza (p -valor < 0,05). Asimismo, se representan los coeficientes estandarizados con la finalidad de valorar de forma mas clara la explicación que cada variable independiente tuvo en los modelos ajustados.

En primer lugar, comprobando los valores del estadístico *Durbin Watson* (DW) y del factor de inflación de la varianza (FIV) (Tabla 2) se puede descartar posibles problemas de autocorrelación y multicolinealidad en todos los modelos obtenidos.

Tabla 2. Ajuste de los modelos de regresión lineal múltiple

| Variables | M-EUL B std | M-UEA B std | M-ZIC B std | M-ZC B std | M-G4 B std |
|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| Intercepto | 1,107 | -0,089 | 0,341 | 0,866 | 2,442 |
| DensPob | ,355 | ,141 | ,418 | ,351 | ,284 |
| CrecPob | | ,243 | | | ,135 |
| PIncViv | ,126 | | | | |
| PIncRenta | | ,135 | | | |
| DensCarNacyCom | | | | | ,121 |
| AyunIzq | ,121 | | ,140 | | |
| PUrbaniza | | ,336 | ,124 | ,260 | ,176 |
| PSueNoUrbCom | | | | -,120 | -,088 |
| DistCom | | | | ,765 | |
| DistUniv | | | | | ,426 |
| DistHosp | | | | | -,276 |
| DistCarNacyCom | | | | | -,283 |
| DistHidro | -,189 | | | | -,095 |
| Distabos | | -,124 | | | |
| DistNatur | | | -,167 | | |
| DistCenNeg | -,447 | | -,118 | -,986 | -,605 |
| PNatur | -,137 | ,320 | | | ,114 |
| Pme3 | | | ,252 | | |
| P801y1000 | | | -,094 | | |
| R^2 | 0,51 | 0,42 | 0,65 | 0,53 | 0,73 |
| FIV < | 1,417 | 1,551 | 2,924 | 1,51 | 2,07 |
| DW | 2,156 | 1,740 | 1,699 | 2,124 | 1,727 |

En cuanto a la calidad del ajuste de los cuatro modelos, observamos que los resultados son algo bajos a excepción del estimado para las zonas industriales y comerciales. Sin

embargo, se incrementa notablemente cuando agrupamos todas las categorías, llegando hasta el 73% de la explicación de la variabilidad del modelo.

En segundo lugar, comprobamos que existe una gran variedad en cuanto a las variables que resultan significativas en unos y otros modelos, pues en la mayoría de los casos sólo han sido seleccionadas 5 ó 6 variables de las 19 finalmente retenidas, siendo el modelo que agrupa a todas las categorías el que aglutina un número mayor de ellas (11).

En este sentido es de destacar que la única variable que resulta significativa para todos los modelos es la densidad de población. El porcentaje de suelo urbanizable disponible en 1990 y la distancia al centro de Madrid son también significativos para prácticamente todos los modelos tratados. De hecho esta última no lo es exclusivamente en el caso del crecimiento de urbanizaciones exentas y/o ajardinadas y sin embargo hubiera sido esperable puesto que muchas de esas urbanizaciones se han convertido en residencia principal de personas que siguen trabajando en Madrid y que han abandonado el municipio en busca de mejor calidad de vida.

Deteniéndonos ahora en cada uno de los modelos por separado, comprobamos que entre las 6 variables seleccionadas para el ajuste del modelo de estructura urbana laxa (**M-EUL**) encontramos una predominancia de las relacionadas con la accesibilidad, aunque también fueron seleccionadas variables de tipo socioeconómico e incluso político. Por otro lado se trata del único modelo en el que el incremento del patrimonio inmobiliario entre 1990 y 2000 resulta significativo. Si atendemos a los coeficientes estandarizados, podríamos decir que según este modelo los municipios en los que más aumenta este tipo de urbanización serían principalmente, y en este orden de importancia, los más cercanos a la ciudad de Madrid, los de mayor densidad de población y los que se encuentran a una menor distancia media de un curso de agua.

Por su parte el modelo ajustado para el crecimiento de la categoría urbanizaciones exentas y/o ajardinadas (**M-UEA**) incluyó hasta 6 variables, siendo este modelo en el que se consigue explicar el menor porcentaje de la variabilidad de los datos (42%). En este caso observamos un mayor peso de las variables socioeconómicas y de planificación, aunque las variables relacionadas con la proximidad a elementos naturales juegan también un papel importante. No en vano, y según se recoge en la descripción inicial del crecimiento urbano experimentado en la región, este tipo de

urbanización creció de manera más importante en los municipios serranos de la misma, próximos a zonas forestales y con un importante patrimonio natural. Es de destacar también que sea el único modelo en el que el incremento de la renta entre 1990 y 2000 resulte significativo, especialmente si tenemos en cuenta que son los sectores de población con mayor poder adquisitivo los que acceden a este tipo de inmuebles. Atendiendo de nuevo a los coeficientes estandarizados, podemos decir que el crecimiento de este tipo de urbanizaciones vendría determinado por el porcentaje de suelo urbanizable disponible en el municipio, el volumen de superficie municipal catalogada como espacio natural protegido y el incremento de población experimentado.

El modelo ajustado para el crecimiento de la categoría zonas industriales y comerciales (**M-ZIC**) incluyó hasta 7 variables, alcanzando el mayor porcentaje de explicación de la variabilidad de los datos de todas las categorías tratadas individualmente (65%). Destaca en este caso la incorporación de dos variables relacionadas con la topografía, lo que indica que el desarrollo de esta categoría está supeditado a la existencia de condiciones constructivas adecuadas (pendientes suaves y altitudes bajas). También se deriva de los resultados que los municipios potencialmente gobernados por los dos principales partidos de izquierda (IU y PSOE) influyen positivamente en el desarrollo de nuevas zonas comerciales e industriales. En resumen, y atendiendo a las variables que presentan los coeficientes estandarizados más elevados, el modelo muestra que el crecimiento de esta categoría principalmente viene determinada por la existencia de importantes densidades de población, unas pendientes moderadas ($< 3\%$) y espacios naturales protegidos próximos.

En el caso de las zonas en construcción (**M-ZC**), sólo se seleccionaron 5 variables. El modelo resultante arroja de nuevo que es la distancia al centro de negocios lo que va a determinar la aparición de nuevas superficies artificiales, junto con la densidad de población. Sin embargo, destaca el segundo puesto ocupado por la distancia a los centros comerciales existentes en 1990, lo que indica que son los municipios con una distancia media menor a las grandes superficies comerciales los que registran un mayor incremento de zonas en construcción. Este resultado es de especial interés, puesto que de algún modo revela la importancia que la aparición de estos centros está teniendo en la dinámica urbana de la región. Finalmente comprobamos como estas nuevas

superficies artificiales no aumentan en municipios con mayores porcentajes de suelo no urbanizable.

Por último, el modelo ajustado para la suma de las 4 categorías de crecimiento urbano (**M-G4**) mostró mejores resultados, incluyendo éste 10 variables independientes. En este contexto más generalizado ha sido posible la incorporación de otras variables tradicionalmente relacionadas con el crecimiento urbano como la distancia media o densidad media de carreteras principales en el municipio. Del ajuste del modelo se desprende que tanto el crecimiento como la densidad de población son factores influyentes en el crecimiento urbano, del mismo modo que las condiciones de accesibilidad a hospitales, carreteras y al centro de negocios. No obstante, sorprende cuanto menos que la segunda variable más influyente sea la distancia a Universidades pero en sentido negativo, es decir, que los mayores incrementos del conjunto de estas superficies artificiales se produce en aquellos municipios más alejados de los principales centros de enseñanza superior.

4.2. Resultados del ajuste de los modelos por mínimos cuadrados parciales PLS

Con la aplicación de esta metodología se obtuvo como resultado una matriz de 31 factores, los cuales explican entre el 58 y 78 % la variabilidad de las variables independientes X y el 64 % la de las variables dependientes Y .

En este sentido, y con la finalidad de poder hacer una comparación entre los resultados obtenidos con RLM y PLS, se incluyeron todos los factores al obtener los coeficientes β_{PLS} .

En la tabla 3 se muestran los resultados de los modelos y en la figura 2a, 2b, 2c, 2d y 2e se presenta la comparación entre las variables seleccionadas por los modelos de regresión lineal múltiple y sus correspondientes variables en los modelos de regresión por mínimos cuadrados parciales. Se puede apreciar que, en general, los modelos son bastante comparables. Tan sólo encontramos algunos desajustes importantes en la variable distancia al centro de negocios del modelo ajustado EUL, que aunque en ambos modelos posee signo positivo, en el PLS tiene un valor mayor (Figura 2a). Por su parte, la variable distancia al centro de negocios del modelo ajustado ZIC (Figura 2c), muestra valores similares, pero signo contrario ($RLM = -0,118$ y $PLS = 0,10$).

Para el modelo **EUL**, además de las variables seleccionadas en la RLM, la distancia a zonas comerciales, universidades y hospitales poseen correlaciones relevantes con el crecimiento de esta categoría. Asimismo se deriva que la ubicación de esta categoría urbana se produce en municipios con pendientes suaves.

Tabla 3. Coeficientes de regresión para cada variable dependiente

| | Ln-EUL | Ln-UEA | Ln-ZIC | Ln-ZC | Ln-G4 |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| DensPob | 0,22 | 0,17 | 0,31 | 0,36 | 0,26 |
| CrecPob | -0,02 | 0,26 | -0,06 | 0,01 | 0,14 |
| CrecEmp | -0,01 | 0,00 | -0,08 | 0,00 | -0,02 |
| PincViv | 0,15 | -0,09 | 0,05 | 0,09 | 0,06 |
| PincRent | 0,01 | 0,05 | 0,02 | 0,00 | 0,04 |
| Denscar | -0,03 | -0,11 | 0,20 | -0,08 | -0,02 |
| DensCarnaco | 0,05 | -0,01 | 0,12 | -0,01 | 0,10 |
| Purbaniz | 0,11 | 0,26 | 0,05 | 0,30 | 0,14 |
| PCom | -0,04 | -0,03 | -0,05 | -0,08 | -0,07 |
| PvotoIzq | -0,03 | -0,08 | -0,10 | 0,08 | -0,07 |
| AyunIzq | 0,16 | -0,03 | 0,21 | 0,00 | 0,12 |
| DistHosp | -0,34 | -0,17 | -0,12 | 0,13 | -0,46 |
| DistCom | 0,76 | -0,21 | -0,29 | 1,19 | 0,16 |
| DistUniv | 0,55 | 0,37 | 0,05 | -0,11 | 0,63 |
| DistInNoDe | -0,14 | 0,12 | -0,23 | 0,24 | -0,16 |
| DistCar | 0,07 | -0,16 | 0,02 | 0,03 | -0,08 |
| DistCarnaco | 0,09 | -0,26 | 0,04 | -0,12 | -0,10 |
| Distaos | -0,06 | -0,07 | -0,07 | 0,10 | -0,07 |
| DistHidro | -0,14 | -0,05 | -0,05 | 0,04 | -0,10 |
| DistNatur | -0,05 | 0,04 | -0,07 | 0,05 | -0,01 |
| DistSol | -1,37 | -0,18 | 0,10 | -1,48 | -0,75 |
| PCVbos | 0,04 | -0,01 | 0,06 | 0,20 | 0,05 |
| PCvHUM | 0,07 | 0,08 | 0,03 | -0,01 | 0,08 |
| Pnatur | -0,08 | 0,25 | -0,04 | -0,04 | 0,14 |
| PCvNatur | -0,15 | 0,06 | 0,10 | 0,04 | 0,00 |
| Psur | 0,06 | 0,02 | -0,03 | -0,03 | -0,01 |
| PMe3 | 0,19 | -0,11 | 0,21 | 0,00 | 0,12 |
| P3y6 | -0,04 | 0,05 | -0,07 | -0,08 | -0,05 |
| Pme800 | -0,01 | -0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,01 |
| P801y1000 | -0,06 | -0,01 | -0,05 | -0,09 | -0,04 |
| P1001y1200 | 0,01 | -0,04 | 0,08 | 0,05 | 0,01 |
| R² | 0,58 | 0,55 | 0,72 | 0,59 | 0,78 |

Las variables que complementan la explicación de las **UEA** siguen mostrando el carácter propio de las urbanizaciones de segunda residencia, donde la accesibilidad a las vías de comunicación es un factor determinante en su ubicación. En este caso también resulta significativa la distancia a las universidades públicas, lo que resulta lógico si

tenemos en cuenta que las existentes en 1990 se localizaban en unos pocos municipios del centro de la Comunidad de Madrid.

Para el caso del modelo ajustado **ZIC**, el modelo PLS complementa la selección de las variables que, en alguna medida, explican la localización de esta categoría, seleccionando otras variables adicionales como la densidad de carreteras o la distancia a comercios e instalaciones no deseables.

Por otro lado, el modelo ajustado para las zonas en construcción **ZC** además de la selección de las variables obtenidas en la **RLM**, también correlaciona negativamente la distancia a las carreteras, es decir que la ubicación de las nuevas zonas en construcción se dio en zonas con mejor accesibilidad. Asimismo, este modelo evidencia que esta categoría se desarrolló en municipios con distancias medias mayores a los hospitales y a las instalaciones no deseables.

Por ultimo, el modelo ajustado para la suma de las cuatro categorías **G4** coincide en gran medida con las variables seleccionadas en la **RLM**, debido, principalmente, a que la aglutinación de las 4 categorías hace que aumente el número de municipios con valores de crecimiento de superficies artificiales. El modelo **PLS**, además de las variables seleccionadas en la **RLM**, adiciona dos variables. Primero la correspondiente a la idoneidad del terreno para ser construido, es decir municipios con porcentajes altos de pendientes menores al 3 % son más aptos para la expansión de las nuevas superficies artificiales; y en segundo lugar, las superficies artificiales, en general, se construyeron en municipios con distancia mayores a las instalaciones no deseables.

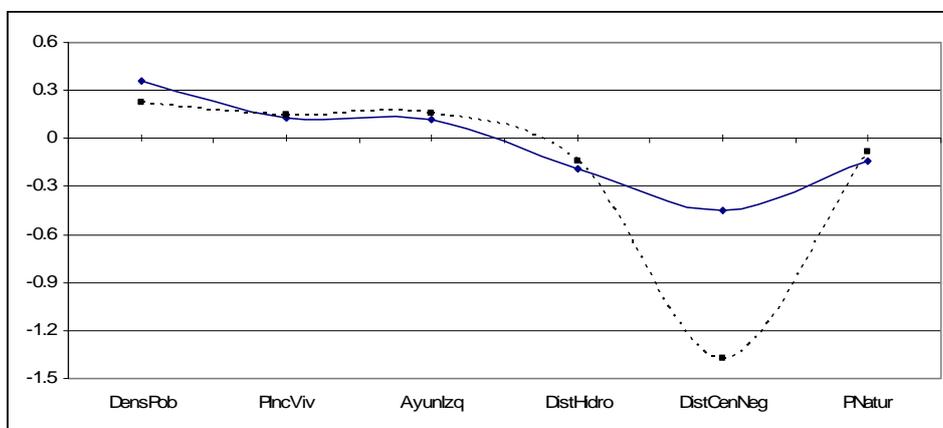


Figura 2a. Comparación de coeficientes de regresión de RLM (línea continua) y PLS (línea de puntos) para Estructura urbana laxa.

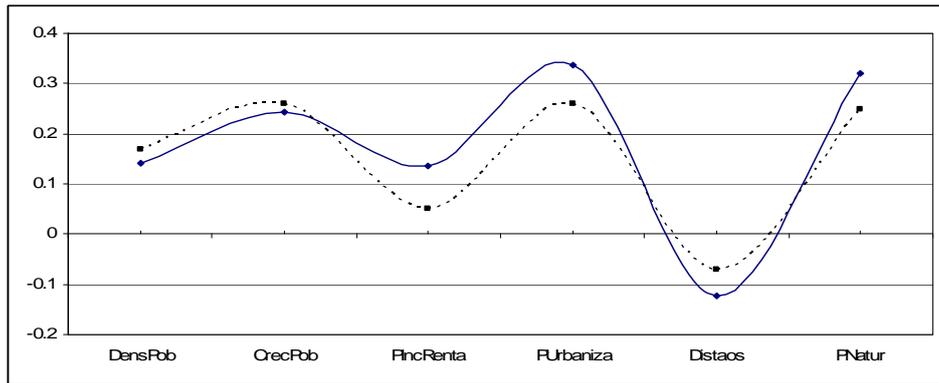


Figura 2b. Comparación de coeficientes de regresión de RLM y PLS para Urbanizaciones exentas

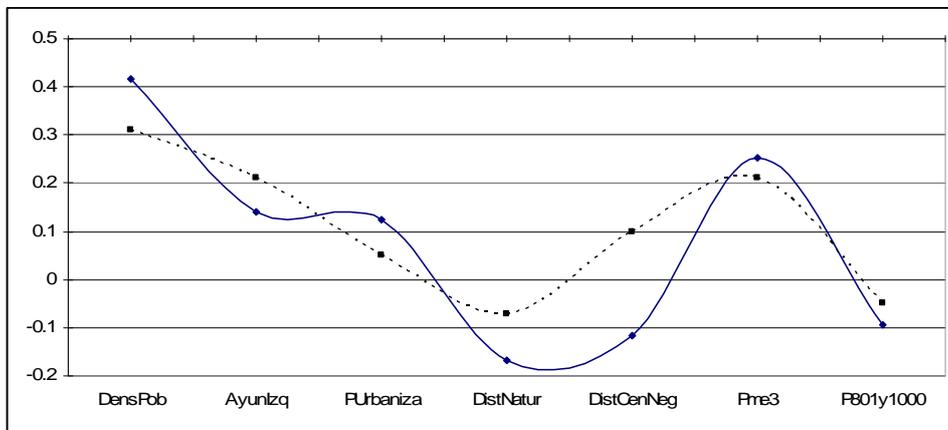


Figura 2c. Comparación de coeficientes de regresión para zonas industriales y comerciales

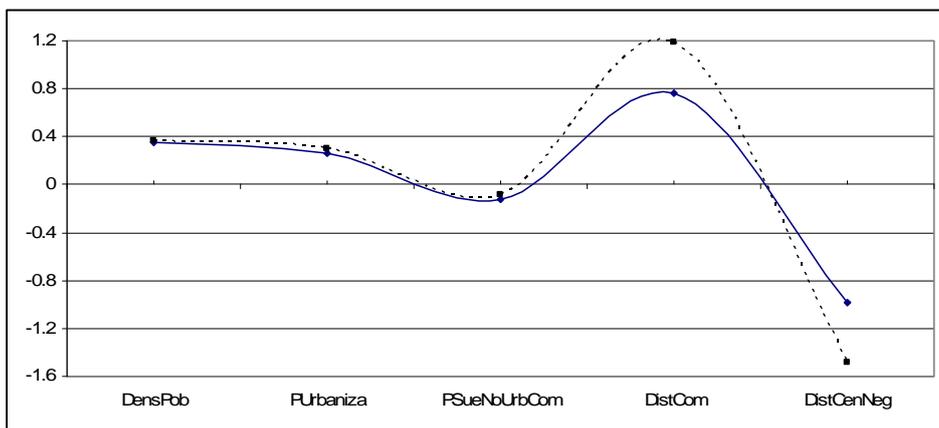


Figura 2d. Comparación de coeficientes de regresión para zonas en construcción

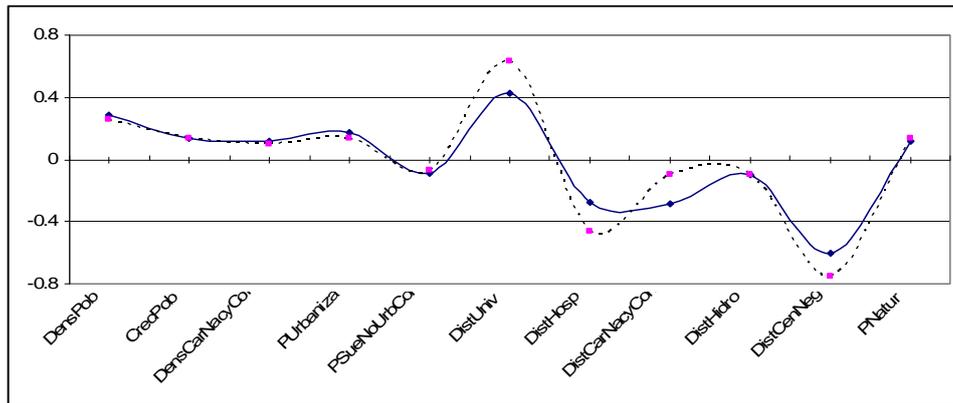


Figura 2e. Comparación de coeficientes de regresión para las cuatro categorías en conjunto

5. CONCLUSIONES

El análisis cuantitativo de los cambios de usos del suelo que se producen en un territorio y la relación que tienen con determinados factores, conlleva habitualmente la incorporación al estudio de una gran cantidad de variables de muy distinta índole (socioeconómicas, biofísicas, de proximidad, etc.) que suelen estar referidas a distintas unidades espaciales, siendo el límite municipal el más habitualmente utilizado.

El uso de métodos estadísticos como el análisis de regresión múltiple, que utilizan como base esta unidad de observación, presentan ciertos inconvenientes a la hora de estudiar estos fenómenos espaciales, pues puede producirse pérdida de información y presentar problemas de falacia ecológica⁵ (Serra et al, 2005; Snijders y Bosker, 1999). Además, la presencia de multicolinealidad y autocorrelación en los modelos supone la exclusión de una gran cantidad de variables que pueden ser determinantes a la hora de comprender el crecimiento urbano (en nuestro caso se eliminaron hasta 25 variables).

El método de regresión de mínimos cuadrados parciales, muy poco aplicado hasta el momento en análisis que implican el estudio de variables espaciales (Yang et al, 2007; Aguilera Aguilera y Garrido Frenich, 2001), subsana algunos de estos inconvenientes, puesto que las exigencias en cuanto a la escala de medida, tamaño de la muestra y distribución de las variables son mínimas. En nuestro caso de estudio, su utilización ha sido muy beneficiosa al complementar los resultados arrojados por el análisis de

⁵ La **falacia ecológica** es un tipo error basado en la errónea interpretación de datos estadísticos, en el que se infiere la naturaleza de los individuos a partir de las estadísticas agregadas del grupo al que dichos individuos pertenecen.

regresión lineal múltiple, permitiendo determinar otros factores influyentes en el fenómeno estudiado que con el primer análisis eran descartados simplemente por las características de las variables que los representaban.

Así, y con el uso conjunto de ambos métodos, se ha podido comprobar que variables tales como: la densidad y el crecimiento poblacional, la distancia media al centro de negocios, la distancia media a vías de comunicación, la pendiente, altitud del terreno o el porcentaje de superficie urbanizable disponible en cada municipio son determinantes a la hora de tratar de entender las lógicas que guiaron el crecimiento urbano a nivel municipal en la Comunidad de Madrid.

6. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación "Crecimiento urbano y sostenibilidad en la Comunidad de Madrid. Una aproximación a los factores explicativos de los cambios recientes de usos del suelo" (Ref: CCG06-UAH/HUM-0670), financiado por la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid (Dirección General de Universidades e Investigación) y la Universidad de Alcalá.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera Aguilera, P. y Garrido Frenich, A. (2001): Aplicaciones ambientales del análisis multivariante. Monografías Ciencias y Tecnología 13, Servicio de publicaciones de la Universidad de Almería.
- Alciaturi, C. E.; Escobar, M. E.; De La Cruz, C. (2005): Partial least squares (PLS) regression and its application to coal analysis. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 26 (3), 197-204.
- Bocco, G.; Mendoza, M.; Masera, O. (2000): La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 44, 18-38.
- Cheng, J. y Masser, I. (2003): Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China. *Landscape and Urban Planning*, 62, 199-217.
- Conway Tenley, M. (2005): Current and future patterns of land-use change in the coastal zone of New Jersey. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32, 877-893.

- Davies, M. (2001): Uncertainty testing in PLS regression. *Spectroscopy Europe* 13/2.
- European Environment Agency (2006): Urban sprawl in Europe, the ignored challenge. EEA Report No 10/2006.
- Garimella Purna, S. K.; Prow, L. A. y Metzger, L. E. (2005): Utilization of Front-Face Fluorescence Spectroscopy for Analysis of Process Cheese Functionality. *American Dairy Science Association*, 88, 470-477.
- Hoshino, S. (2001). Multilevel modeling on farmland distribution in Japan. *Land Use Policy*, 18 (1), 75-90.
- Hu, Z. y Lo, C.P. (2007): Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31, 667-688.
- Lesschen, J. P.; Verburg, P.H.; Staal, S. J. (2005): Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems. LUCR Report Series 7, Wageningen University, the Netherlands.
- Menard, S. (2002): Applied logistic regression analysis, Second Edition. SAGE Publications.
- Montgomery, D.; Elizabeth P.; Geoffrey V. (2005): Introducción al análisis de regresión lineal. Compañía Editorial Continental, México.
- Observatorio de la Sostenibilidad en España (2006). Cambios de ocupación del suelo en España, implicaciones para la sostenibilidad, Observatorio para la Sostenibilidad en España, Alcalá de Henares, Madrid.
- Pan William K.Y., Bilborrow Richard E. (2005). "The use of a multilevel statistical model to analyze factors influencing land use: a study of the Ecuadorian Amazon", *Global and Planetary Change*, 47, 232– 252.
- Serra, P.; Pons, X.; Sauri, D. (2005). "Metodología para el análisis de las transformaciones paisajísticas de áreas rurales mediterráneas. Evolución, causas y consecuencias en el caso del Alto Ampurdán (Noreste de Cataluña)", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 25, 259-278.
- Snijders, T. y Bosker, R. (1999). Multilevel Analysis. An introduction to Basic and advanced multilevel modelling. SAGE Publications.
- Verburg P. H.; Ritsema van Eck, J. R.; de Nijs, T. C.M.; Dijst, M.J. y Schot P. (2004): Determinants of land-use change patterns in the Netherlands, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31, 125-150.
- Wold, S.; Trygg, J.; Berglund, A. y Antti, H. (2001): Some recent developments in PLS modelling. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 58, 131–150.
- Yang, Z.; Chenghu, Z.; Yongmin, Z. (2007): A partial least-squares regression approach to land use studies in the Suzhou-Wuxi-Changzhou region, *Journal of Geographical Sciences*, 17 (2), 234-244.

Anexo 2

Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG

Publicación:

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2008). “Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG”, *Revista de Planeamiento Territorial y Urbanismo Iberoamericana*, num. 0, España.

http://www.planeamientoyurbanismo.com/numeros-antiores.asp?id_periodo=3

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis de los factores explicativos del crecimiento urbano, específicamente, para las categorías estructura urbana laxa, urbanizaciones exentas, zonas industriales y comerciales y zonas en construcción en la Comunidad de Madrid en el período 1990-2000. De todas las categorías artificiales del Corine Land Cover (CLC), éstas han sido identificadas en estudios previos como las que mayor crecimiento han presentado. Como factores explicativos del crecimiento urbano se tomaron variables socioeconómicas, biofísicas, de planeación, políticas y de proximidad/accesibilidad espacializadas a nivel municipal y a nivel de píxel. El análisis entre las variables explicativas y el crecimiento urbano se llevó a cabo a través de técnicas estadísticas de regresión logística espacial y análisis de regresión logística multinivel. El ajuste de los modelos se realizó, por un lado, con el SIG Idrisi Andes, a través de la herramienta de regresión logística espacial, por otro lado, para el ajuste de los modelos de regresión logística multinivel se empleó el software MLwin. Los resultados obtenidos del ajuste de los modelos muestran la importancia de algunas variables en la ubicación de las nuevas zonas urbanas analizadas, además de identificar la variabilidad de la información en el área de estudio.

Palabras clave: SIG, planificación, crecimiento urbano, modelos, variables, Madrid.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the explanatory factors of urban growth. Specifically, four categories were analyzed: residential discontinuous urban, residential discontinuous sparse urban, commercial and industrial, and areas under construction. The study area is located in Madrid (Spain) during the period of 1990-2000. Previous analysis of Corine Land cover land use change identified these categories as having the largest growth during the study period. Socio-economic, biophysical, planning, policies and proximity/accessibility variables were taken into account as explanatory factors of urban growth. These variables were used at both, municipal and pixel level. Logistic and multilevel regressions were used in order to analyse the relationship between explanatory variables and urban growth. The adjustment of the models was performed using two different software packages: GIS Idrisi Andes to apply the spatial logistic regression and MLwin to apply the multilevel logistic regression. Model adjustment showed that significance among variables varies considerably, this allows for the identification of the main explanatory variables of urban growth. Additionally, it was possible to identify the variability of information at the municipal and pixel level.

Keyword: GIS, planning, urban growth, models, variables, Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente el crecimiento de las ciudades estaba determinado por el aumento de la población. Sin embargo, en la actualidad, en lugares donde hay poca o ninguna presión demográfica, existe otra variedad de factores que influyen en su crecimiento (EEA, 2006).

Esta dinámica de crecimiento urbano está provocando importantes cambios de usos del suelo, ocasionando como consecuencia una enorme presión sobre el territorio y sus recursos naturales, sobre la calidad de vida de las personas y sobre la sostenibilidad global del planeta (OSE, 2006). Es de gran importancia, por tanto, estudiar los patrones de crecimiento de las nuevas zonas urbanas y analizar los factores que inciden en el mismo a través de la relación espacial entre diversas variables (socioeconómicas, biofísicas, de accesibilidad, etc.).

En los últimos años se han desarrollado diversos estudios en este sentido, a partir de la aplicación de distintos métodos estadísticos (Bocco et al, 2000; Hoshino, 2001; Cheng y Masser, 2003; Verburg et al, 2004a; Conway, 2005; Pan y Bilborrow, 2005; Serra et al, 2005; Hu y Lo, 2007). Asimismo, Lesschen et al, (2005) en el informe número 7 del programa Land Use and Land Cover Change (*LUCC*), proporciona una amplia descripción de técnicas estadísticas y empíricas utilizadas en el análisis espacial de cambios de usos y coberturas del suelo.

En general encontramos que una buena parte de estos estudios se realizan a nivel municipal o alguna delimitación a nivel regional (Yang et al, 2007; Serra et al, 2005; Bocco et al, 2000), pero es más común encontrar trabajos donde el nivel de análisis es el píxel y en esta unidad de observación la técnica que ofrece mayores ventajas para determinar factores explicativos es la regresión logística. También, existen algunas investigaciones recientes en las cuales se aplican técnicas con diferentes niveles de observación (Verburg et al, 2004a; Hoshino, 2001; Pan y Bilborrow, 2005). A dichos modelos se les denomina modelos jerárquicos o multinivel.

Para el caso de la Comunidad de Madrid existe una diversidad de factores que guían los cambios de usos del suelo y en particular los relacionados con el crecimiento urbano. Asimismo, se tiene como mínimo dos unidades de observación y que forman una

especie de jerarquía. Las unidades de observación empleadas en este trabajo son el píxel y los municipios madrileños.

Se puede decir que la dinámica de la ocupación del suelo (y más en concreto el crecimiento urbano) responde, como mínimo, a dos tipos de influencias: en primer lugar las características físicas del terreno: la altitud y pendiente del terreno inciden en la rentabilidad de la construcción de nuevas zonas residenciales. Lo más razonable es medir este tipo de influencias al nivel de cada punto del terreno, cada píxel, ya que estas características pueden variar rápidamente en el territorio.

Un segundo tipo de influencias sobre el crecimiento urbano son las características sociales y económicas y, también, los hechos legales y administrativos. Es razonable pensar que la dinámica económica y demográfica y las características de los planes de ordenación urbana afectan a donde es más rentable construir y donde es posible hacerlo desde el punto de vista legal. Estas variables solo se pueden medir, en España, a nivel municipal.

En resumen, este trabajo tiene como objetivo determinar los factores que expliquen de forma cuantitativa la localización de las nuevas superficies artificiales en la Comunidad de Madrid, a través de dos métodos estadísticos (Regresión Logística y Análisis Multinivel) y Sistemas de Información Geográfica y realizar una comparación de los resultados obtenidos.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

La Comunidad de Madrid se localiza en el centro de España y limita con las provincias de Guadalajara, Cuenca, Toledo, Ávila y Segovia (Figura 1). Se encuentra conformada por 179 municipios en una extensión territorial de 8.025 km². Su población estimada es de aproximadamente 6 millones de habitantes, gran parte de la cual se concentra en el área metropolitana, aunque a partir de la década de 1990 se evidenciaron fuertes procesos de descentralización hacia algunos municipios del oeste, norte y sureste de la región.

En este contexto la Comunidad de Madrid se consolida como uno de los territorios de mayor dinamismo del arco mediterráneo, con un crecimiento de las superficies artificiales aproximado del 48 % durante la década de los 90, muy por encima del 25 %

de crecimiento medio registrado en el territorio nacional y del 5,4 % de la Unión Europea (EEA, 2006; OSE, 2006). En este sentido las zonas urbanas han aumentado en 14.310 ha, de las cuales el 80 % corresponde al tejido urbano discontinuo. La distribución de estas nuevas zonas aparece en la figura 1.

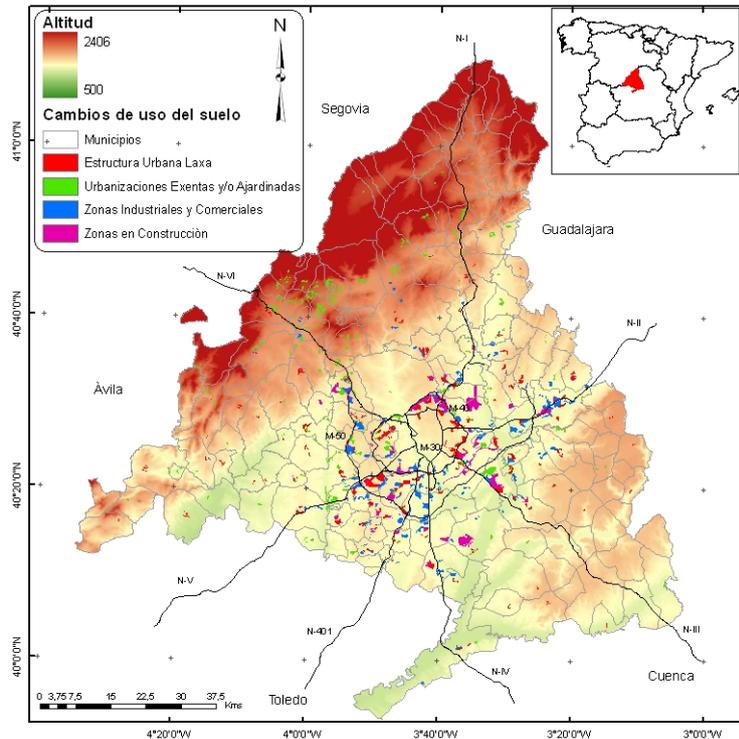


Figura 1. Crecimiento urbano en la Comunidad Autónoma de Madrid (1990-2000)
Fuente. Elaboración propia a partir del CLC1990 y 2000. Instituto Geográfico Nacional, España

La elección de las variables o factores explicativos de este fenómeno de expansión urbana se realizó tomando en consideración la literatura existente sobre este tipo de análisis y la disponibilidad de información de la región para llevarlo a cabo. De este modo, como variables explicativas, y tomando como referencia el año 1990, se recopiló información de hasta 32 variables diferentes de tipo socioeconómico, político, de planificación, proximidad/accesibilidad y de tipo biofísico (Tabla 1).

Por otro lado, un estudio previo obtuvo que las categorías artificiales que mayor crecimiento tuvieron en el periodo de 1990 a 2000 en la Comunidad de Madrid son: estructura urbana laxa, urbanizaciones exentas, zonas industriales y comerciales, y zonas en construcción (Plata et al, 2008), misma que son tomadas en este estudio como variables dependientes (Figura 1 y Tabla 1)

Tabla 1. Descripción de las variables dependientes e independientes utilizadas en el ajuste del modelo. Todas las variables que miden crecimientos o cambios se refieren al periodo 1990-2000. Las variables que muestran un valor se refieren al año 1990.

| Tipo de Variable | Nombre de la variable | Descripción |
|------------------------------|-----------------------------------|--|
| Crecimiento de zonas Urbanas | GEUL | Crecimiento de la categoría estructura urbana laxa |
| | GUEA | Crecimiento de la categoría urbanizaciones exentas y/o ajardinadas |
| | GZIC | Crecimiento de la categoría zonas industriales y comerciales |
| | GZC | Crecimiento de la categoría zonas en construcción |
| | G4 | Crecimiento de la categoría 4 categorías anteriores |
| Socio económicas | DensPob | Densidad de población (1990) |
| | CrecPob | Incremento Población |
| | CrecEmp | Incremento Empleos |
| | PIncrViv | Incremento de número de viviendas (%) |
| | PIncrRenBruta | Incremento de renta bruta (%) |
| Planificación | DensCar | Densidad de carreteras (todas) |
| | Purbaniza | Porcentaje de superficie urbanizable |
| Políticas | Pcom | Porcentaje de suelo no urbanizable común |
| | Pvotoizq | Porcentaje de votos obtenidos por los partidos de izquierda en 1995 ¹ |
| Proximidad/ Accesibilidad | Ayunizq | Ayuntamientos potencialmente gobernados por partidos de izquierda ² |
| | DistCar | Distancia a Carreteras |
| | DistHosp | Distancia a Hospitales |
| | DistCom | Distancia a grandes superficies comerciales |
| | DistUniv | Distancia a Universidades |
| | DistInstND | Distancia a Instalaciones no deseables |
| | DistBosq | Distancia a Bosque |
| | DistHid | Distancia a hidrografía |
| | DistAreaNatu | Distancia a áreas naturales protegidas |
| | DistCentNeg | Distancia al CBD de Madrid |
| | DistUrb1990 | Distancia a zonas urbanas en 1990 |
| | DistTUC | Distancia al Tejido Urbano Continuo |
| | DistEUL | Distancia a estructura urbana laxa |
| | DistUEA | Distancia a Urbanizaciones exentas y/o ajardinadas |
| | DistZIC | Distancia a zonas industriales y comerciales |
| DistZC | Distancia a zonas en construcción | |
| Biofísicas | CVBosq | Píxeles en la cuenca visual de bosques |
| | CVHum | Píxeles en la cuenca visual de humedales |
| | Areanatu | Píxeles en espacios naturales protegidos |
| | CVAreaNatu | Píxeles en la cuenca visual de espacios naturales protegidos |
| | OriSur | Píxeles con orientación Sur-suroeste |
| | Pendiente | Pendiente del terreno |
| | Altitud | Altitud del terreno |

3. METODOLOGÍA

3.1. Regresión logística espacial

Previo al ajuste de los modelos se realizó un análisis de correlación y multicolinealidad a las variables para eliminar aquellas que pudiesen causar problemas en los modelos.

El modelo de regresión logística se realiza utilizando la siguiente ecuación:

¹ Porcentaje de votos a Izquierda Unida y PSOE

² Ayuntamientos en los que la suma de los votos a Izquierda Unida y PSOE supera el 45%.

$$\log \text{it} \left[\frac{Y=1}{Y=0} \right] = \frac{P}{1-P} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

Donde: β son los parámetros estimados por el modelo; x_1, x_2, \dots, x_k son las variables explicativas incluidas en el modelo; y P es la probabilidad de que un píxel se transforme a urbano.

También se generaron para el análisis algunas variables de vecindad, las cuales se midieron por un “factor de enriquecimiento” definido como la proporción de cierto uso del suelo en la vecindad P_V entre la proporción de este mismo uso del suelo en el área de estudio P_{AE} (Verburg et al, 2004a, Verburg et al, 2004b) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F_{ikd} = \frac{P_V}{P_{AE}}$$

Así, se procedió a ajustar 5 modelos de regresión logística espacial para el conjunto de variables y 5 modelos de regresión logística para las variables de vecindad. En todos los casos las variables dependientes fueron las cinco mencionadas anteriormente. La validación de los modelos se certificó con el estadístico *ROC (Relative Operating Characteristic)* y a través del porcentaje de píxeles clasificados correctamente (*PCCI*).

Por último, la capacidad computacional del SIG *Idrisi Andes* en el ajuste de modelos de regresión logística espacial esta limitada a la inclusión de no más de 20 variables independientes, por tal motivo se realizó una selección de variables, tomando en cuenta el grado de multicolinealidad, correlación y el ajuste de cada variable independiente con cada variable dependiente.

3.2. Análisis de regresión logística multinivel

Para realizar el análisis multinivel, más complejo y difícil, se utilizó una única variable dependiente la **G4**, es decir la sumatoria de las 4 categorías de mayor crecimiento urbano, y como variables independientes aquellas que resultaron más significativas en los análisis realizados a nivel de municipio y píxel.

Para realizar el ajuste de los modelos multinivel, es necesario primero ajustar un modelo vacío (modelo más simple de descomposición de la varianza) para la variable

dicotómica de crecimiento urbano (1 crecimiento, 0 otro) referida a los municipios, sin tomar en cuenta las variables explicativas a través de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\pi_{ij} &= P(y_{ij} = 1) \\ \log it(\pi_{ij}) &= \log \left[\frac{\pi_{ij}}{1 - \pi_{ij}} \right] = \beta_{0j} \\ \beta_{0j} &= \beta_0 + U_{0j}\end{aligned}$$

Donde: β_0 es el intercepto general ó específicamente es el promedio de los datos de las probabilidades transformadas y U_{0j} es la desviación aleatoria de ese promedio por grupo j (Overmars y Verburg, 2006; Snijders y Bóxer, 1999: 213).

A partir de este modelo la varianza de la variable dependiente puede ser descompuesta en dos partes, una causada por el nivel individual (píxel) y otra causada por el nivel de grupo (municipio). De esta forma se utilizó este modelo para saber si la varianza del nivel de municipio en la variable dependiente es significativa (Overmars y Verburg, 2006).

Posteriormente, al modelo vacío se le añadieron variables explicativas a nivel píxel (nivel 1) y nivel municipal (nivel 2), obteniéndose el modelo regresión logística binomial de intercepto aleatorio:

$$\log it(\pi_{ij}) = \beta_{00} + \sum_{k=1}^k \beta_{k0} x_{kij} + \sum_{h=1}^H \beta_{h0} z_{hj} + U_{0j}$$

Donde: x_{kij} son k variables explicativas al nivel 1 y z_{hj} son las h variables explicativas al nivel 2.

La interpretación de los coeficientes de regresión se realizó por medio de los *odds ratio* ($\exp(\beta)$).

Por último, para indicar la proporción de varianza que es contabilizada por el nivel 2 se utilizó el coeficiente de correlación intraclases denotado por la siguiente ecuación:

$$\rho_R = \frac{\tau_0^2}{\tau_0^2 + \frac{\pi^2}{3}}$$

Donde: τ_0^2 es la varianza del intercepto aleatorio al nivel de municipio y $\frac{\pi^2}{3} = 3,29$ es la varianza al nivel de píxel (nivel 1) para los residuales de una distribución logística (Snijders y Bóxer, 1999).

4. RESULTADOS

4.1. Resultado del ajuste de los modelos de regresión espacial

De la tabla 2 se puede observar que los ajustes de los modelos son relativamente buenos oscilando los valores del *ROC* entre 0,91 y 0,97 y el *PPCC1* entre 86 y 93 %. La unidad de observación usada es el píxel.

Tabla 2. Resultado del ajuste del modelo de regresión logística binomial mixtos.

| Variables | GEUL | | GUEA | | GZIC | | GZC | | G4 | |
|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| | <i>BETA</i> | <i>Exp(β)</i> |
| Intercepto | 6,07 | | 1,08 | | 4,54 | | 7,64 | | 2,44 | |
| DensPob | 0,30 | 1,001 | 0,11 | 1,000 | 0,05 | 1,000 | 0,29 | 1,000 | 0,28 | 1,000 |
| IncrViv | 0,20 | 1,011 | 0,06 | 1,004 | 0,02 | 1,001 | 0,01 | 1,001 | 0,03 | 1,002 |
| IncrRenBruta | -0,01 | 0,997 | 0,05 | 1,018 | 0,08 | 1,035 | 0,07 | 1,030 | 0,12 | 1,053 |
| Denscar | -0,17 | 1,000 | -0,15 | 1,000 | 0,02 | 1,000 | -0,16 | 1,000 | -0,12 | 1,000 |
| Purbanizable | 0,06 | 1,021 | 0,13 | 1,047 | 0,03 | 1,011 | 0,07 | 1,025 | 0,12 | 1,038 |
| PSueloComun | -0,05 | 0,994 | 0,03 | 1,003 | -0,09 | 0,989 | -0,08 | 0,991 | -0,04 | 0,995 |
| Ayunizq | 0,10 | 1,954 | 0,01 | 1,102 | 0,00 | 1,020 | 0,11 | 2,140 | 0,10 | 1,980 |
| Dist_Urb1990 | -1,51 | 0,996 | -0,65 | 0,998 | -0,32 | 0,999 | -0,27 | 0,999 | -0,39 | 0,999 |
| Dist_TUC | -0,50 | 0,999 | 0,04 | 1,000 | -0,02 | 1,000 | 0,01 | 1,000 | 0,00 | 1,000 |
| Dist_EUL | -0,44 | 1,000 | | | | | | | | |
| Dist_uea | | | 0,00 | 1,000 | | | | | | |
| Dist_ZIC | | | | | 0,00 | 1,000 | | | | |
| Dist_ZC | | | | | | | 0,00 | 1,000 | | |
| Dist_Carret | -0,34 | 0,999 | -0,17 | 0,999 | -0,32 | 0,999 | -0,30 | 0,999 | -0,23 | 0,999 |
| Dist_hid | 0,09 | 1,000 | -0,03 | 1,000 | 0,05 | 1,000 | -0,02 | 1,000 | 0,04 | 1,000 |
| CVBosq | 0,09 | 1,843 | 0,06 | 1,504 | 0,00 | 1,030 | 0,10 | 1,931 | 0,06 | 1,552 |
| CVHum | 0,05 | 2,124 | -0,03 | 0,683 | -0,04 | 0,571 | -0,16 | 0,072 | -0,02 | 0,713 |
| AreaNatur | 0,08 | 3,833 | 0,01 | 1,131 | -0,01 | 0,785 | -0,15 | 0,066 | 0,01 | 1,181 |
| CVAreaNatur | -0,05 | 0,495 | 0,04 | 1,533 | 0,01 | 1,178 | 0,01 | 1,085 | 0,04 | 1,558 |
| OrienSur | -0,04 | 0,783 | -0,02 | 0,880 | -0,01 | 0,934 | -0,01 | 0,945 | -0,02 | 0,888 |
| Pendiente | -0,04 | 0,973 | -0,10 | 0,940 | -0,22 | 0,866 | -0,02 | 0,989 | -0,10 | 0,919 |
| Altura | -0,23 | 0,997 | 0,01 | 1,000 | -0,32 | 0,996 | -0,69 | 0,991 | -0,14 | 0,998 |
| ROC | 0,97 | | 0,90 | | 0,93 | | 0,94 | | 0,91 | |
| PPCC1 | 92,13 | | 82,79 | | 86,65 | | 86,65 | | 92,84 | |

También se puede observar qué variables como la proximidad a las zonas urbanas existentes en 1990 (Figura 2a), la proximidad a carreteras (Figura 2b), la pendiente (Figura 2c), la altitud (Figura 2d) y la densidad de población (Figura 2e) son factores que determinan, hasta cierto punto, la localización de las nuevas zonas urbanas. En este

sentido se pudo observar, de manera general, que a menores distancias a carreteras y zonas urbanas, a menores pendientes y altitudes y a mayores densidades de población existe mayor probabilidad de que se localicen nuevas zonas urbanas.

Por su parte la variable densidad de población se observa que tiene un peso considerable en los modelos ajustados, resultando que a mayor densidad de población (en el municipio donde se sitúa ese píxel) existe mayor probabilidad de crecimiento urbano (Figura 2e).

Por otro lado, se observó que las variables suelo urbanizable y suelo no urbanizable común (variables medidas en los municipios) se comportan inversamente proporcional, es decir conforme aumenta el porcentaje de superficie urbanizable aumenta la probabilidad de que exista crecimiento urbano y conforme aumenta el porcentaje de suelo no urbanizable común dicha probabilidad disminuye (Figura 2f).

Con respecto al resto de las variables biofísicas y tomando en consideración los coeficientes estandarizados observamos que éstas no tienen un peso considerable en los modelos ajustados.

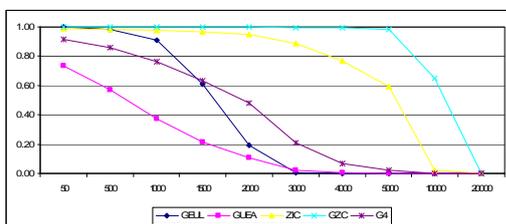


Figura 2a. Distancia a zonas urbanas

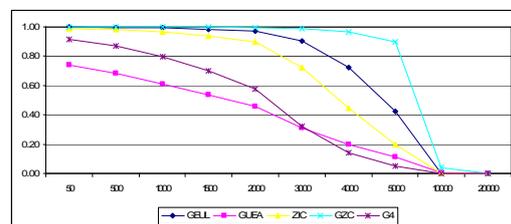


Figura 2b. Distancia a carreteras

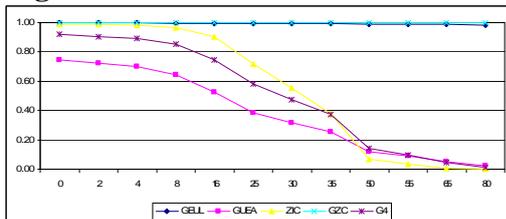


Figura 2c. Pendiente del terreno

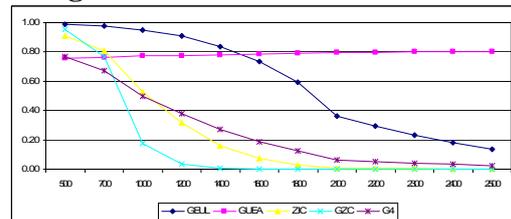


Figura 2d. Altura del terreno

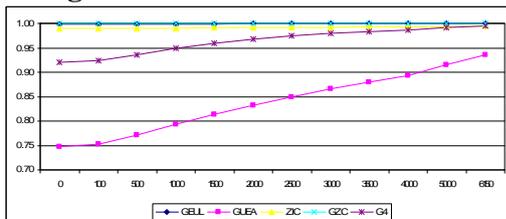


Figura 2e. Densidad de población

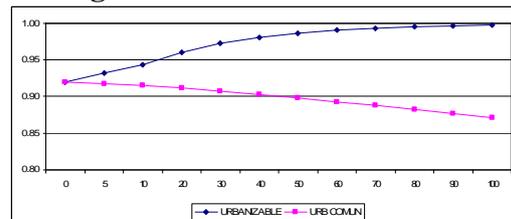


Figura 2f. Suelo urbanizable/no urbanizable

Figura 2. Probabilidades de crecimiento urbano para las diferentes variables analizadas.

Con respecto a los modelos ajustados para las variables de vecindad (Tabla 3) se puede observar que la variable con mayor peso en la explicación del crecimiento urbano es la vecindad a tierras de labor en seco, excepto para las urbanizaciones exentas (Figura 3a). Por su parte el factor de enriquecimiento para los pastizales tiene un efecto positivo, siendo para el modelo que aglomera a las 4 categorías el más correlacionado con el crecimiento de dichas categorías (Figura 3b). Asimismo, la vecindad a la vegetación esclerófila interactúa de manera positiva con las urbanizaciones exentas.

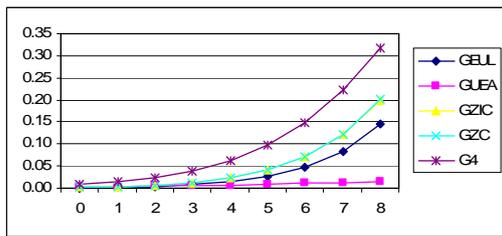


Figura 3a. Vecindad a tierras de labor en seco

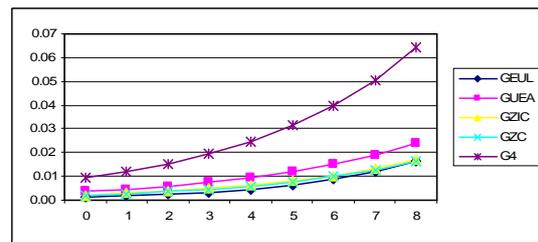


Figura 3b. Vecindad a pastizales

Figura 3. Probabilidades de crecimiento urbano respecto a las variables de vecindad

También se puede observar que los modelos ajustados tienen un efecto positivo con las variables de vecindad a las categorías urbanas, aunque mínimo. Los resultados muestran valores en los ratios cercanos a la unidad y valores pequeños de probabilidades, esto se puede atribuir, principalmente, a la gran extensión del área de estudio lo cual hace que la proporción en el área de estudio del uso de suelo analizado sea muy pequeña y distante de la proporción de dicho uso de suelo en la vecindad.

Tabla 3. Ajuste de los modelos tomando en cuenta solamente las variables de vecindad.

| Variables | GEUL | | GUEA | | GZIC | | GZC | | G4 | |
|-----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|
| | B | Exp(β) | β | Exp(β) | β | Exp(β) | β | Exp(β) | B | Exp(β) |
| Intercept | -6,66 | | -5,62 | | -6,12 | | -6,17 | | -4,68 | |
| vec_tuc | 0,19 | 1,21 | 0,09 | 1,10 | 0,06 | 1,07 | 0,07 | 1,07 | 0,15 | 1,16 |
| vec_eul | 0,17 | 1,19 | 0,05 | 1,05 | 0,11 | 1,11 | 0,10 | 1,10 | 0,16 | 1,17 |
| vec_uea | 0,10 | 1,11 | 0,22 | 1,25 | 0,06 | 1,06 | 0,06 | 1,06 | 0,19 | 1,21 |
| vec_zic | 0,03 | 1,03 | 0,00 | 1,00 | 0,09 | 1,09 | 0,09 | 1,09 | 0,07 | 1,07 |
| vec_zc | 0,02 | 1,02 | 0,01 | 1,01 | 0,01 | 1,01 | 0,01 | 1,01 | 0,02 | 1,02 |
| vec_secano | 0,61 | 1,85 | 0,18 | 1,20 | 0,59 | 1,81 | 0,60 | 1,82 | 0,49 | 1,63 |
| vec_esclerofila | -0,10 | 0,91 | 0,08 | 1,09 | -0,23 | 0,79 | -0,18 | 0,84 | -0,03 | 0,97 |
| vec_pastizales | 0,32 | 1,37 | 0,24 | 1,27 | 0,26 | 1,29 | 0,26 | 1,30 | 0,25 | 1,28 |
| ROC | 0,88 | | 0,78 | | 0,82 | | 0,82 | | 0,80 | |

4.2. Resultados del modelo de regresión logística multinivel

Los resultados muestran que la varianza para el nivel 2 es significativa ($p < 0,05$) en los 3 modelos (Tabla 4). Por su parte, el coeficiente de correlación intraclases para el modelo vacío indica que el 25 % de la varianza puede ser atribuida al nivel 2 (límites de municipio). En principio, dicha varianza podría ser contabilizada por algunas variables explicativas.

Tabla 4. Resultado del ajuste de los modelos de regresión logística multinivel.

| Niveles | Variables | Modelo 1 | Modelo 2 | Modelo 3 | |
|--------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|
| Efectos Fijos | Intercepto | 1,374 | 5,798 | 2,154 | |
| | Dist_Urb1990 | | -0,0014 * | -0,0013 * | |
| | Dist_TUC | | -0,0001 --- | -0,00003 --- | |
| | Dist_Carret | | -0,001 * | -0,001 * | |
| | Dist_hid | | 0,00004 * | 0,00013 * | |
| | CVBosq | | 0,609 ** | 0,444 ** | |
| | CVHum | | -0,334 ---- | -0,456 ---- | |
| | Nivel 1. Pixel | AreaNatur | | 0,121 ---- | 0,004 ---- |
| | | CVAreaNatur | | 0,515 ---- | 0,353 ---- |
| | | OrienSur | | 0,030 ---- | 0,071 ---- |
| | | Pendiente | | -0,082 ** | -0,080 ** |
| | | Altura | | -0,003 * | -0,003 * |
| | Nivel 2. Municipio | DensPob | | 0,0004 * | 0,0005 * |
| IncrViv | | | | -0,002 ---- | |
| IncrRenBruta | | | | 0,060 * | |
| Denscar | | | -0,0001 * | -0,0001 * | |
| Purbanizable | | | | 0,026 ** | |
| PSueloComun | | | | -0,0005 ---- | |
| Ayunizq | | | | 0,601 ** | |
| $Var(U_{0j}) = \tau_0^2$ | | 1,097** (0,138) | 0,694** (0,186) | 0,729** (0,190) | |
| Efectos Aleatorios | ρ_R | 0,25 | 0,17 | 0,18 | |

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; --- No significativa

De esta forma en el modelo 2 se introducen todas las variables a nivel de píxel y dos variables a nivel de municipio. Dichas variables resultan significativas en este modelo y explican un 8 % de la varianza que se detectó en el modelo 1 a nivel municipal.

Por otro lado en el modelo 3 se incluye todas las variables explicativas al nivel 1 y 2, observándose la existencia de variables significativas en ambos niveles, pero el coeficiente de correlación intraclases muestra también que las nuevas variables incluidas no explican toda la varianza detectada en los modelos anteriores.

En resumen, se pudo observar que las variables incluidas al nivel 2 explican muy poco de la varianza detectada en el modelo vacío, lo cual podría deberse, principalmente, a la

extensión del territorio estudiado, en el cual la variable dependiente (crecimiento urbano) se distribuye de forma difusa e irregular, e incluso en algunos municipios no crece. Lo anterior ocasiona que exista una gran variación en el crecimiento urbano a lo largo y ancho de la Comunidad y que el coeficiente de correlación intraclases detecte un gran porcentaje de variabilidad entre el nivel 1 y 2.

5. CONCLUSIONES

El análisis cuantitativo de los cambios de usos del suelo que se producen en un territorio y la relación que tienen con determinados factores, conlleva habitualmente la incorporación al estudio de una gran cantidad de variables de muy distinta índole (socioeconómicas, biofísicas, de proximidad, etc.) que suelen estar referidas a distintas unidades espaciales, siendo los límites municipales y el píxel los más utilizados habitualmente.

En este sentido la regresión logística espacial permitió incluir ambas unidades de observación obteniéndose resultados consistentes en los modelos, objetivos y de fácil interpretación. Del mismo modo, la gráfica de probabilidad permitió observar de manera clara la influencia que cada variable tiene con el crecimiento urbano.

Por otro lado, los modelos de regresión logística multinivel permitieron detectar la distribución de la variabilidad de la información en ambos niveles, así como algunas variables, que en su unidad de observación, no son significativas en los modelos. Sin embargo, las variables incluidas al nivel municipal (nivel 2) no detectan completamente la variabilidad de la información, con lo cual quedaría, para trabajos futuros, determinar el grado de interacción que tienen las variable a ambos niveles, utilizando para ello modelos con pendiente aleatoria, no obstante esto suele ser más complejo.

Por último, con el uso conjunto de ambos métodos, se ha podido comprobar, que variables tales como: la densidad y el crecimiento poblacional, la distancia al centro de negocios, la distancia a vías de comunicación, la distancia a las zonas urbanas existentes, la pendiente, la altitud del terreno o el porcentaje de superficie urbanizable disponible en cada municipio son determinantes a la hora de tratar de entender las lógicas que guiaron el crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid.

6. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación "Crecimiento urbano y sostenibilidad en la Comunidad de Madrid. Una aproximación a los factores explicativos de los cambios recientes de usos del suelo" (Ref: CCG06-UAH/HUM-0670), financiado por la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid (Dirección General de Universidades e Investigación) y la Universidad de Alcalá.

7. REFERENCIAS

- Bocco, G., Mendoza, M., Masera, O. (2000). "La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación", *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 44, pp. 18-38.
- Cheng, J. and Masser, I. (2003): "Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China", *Landscape and Urban Planning*, 62, 199-217.
- Conway Tenley M., (2005). "Current and future patterns of land-use change in the coastal zone of New Jersey", *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32, 877-893.
- European Environment Agency (2006). *Urban sprawl in Europe, the ignored challenge*, EEA Report No 10/2006.
- Hoshino, S. (2001). "Multilevel modeling on farmland distribution in Japan", *Land Use Policy*, 18, 75-90.
- Hu, Z., and Lo, C.P. (2007). "Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression", *Computers, Environment and Urban Systems*, doi:10.1016/j.compenvurbsys.2006.11.001
- Lesschen, J. P., Verburg, P. H., Staal, S. J. (2005). *Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems*, LUCC Report Series 7, publicado por: The International Livestock Research Institute, Nairobi, Kenya y LUCC Focus 3 Office, Wageningen University, the Netherlands
- Observatorio de la Sostenibilidad en España (2006). *Cambios de ocupación del suelo en España, implicaciones para la sostenibilidad*, Observatorio para la Sostenibilidad en España, Alcalá de Henares, Madrid, impreso por Artes Gráficas Cuestas S. A.
- Overmars, K. P., Verburg, P. H. (2006). "Multilevel modelling of land use from field to village level in the Philippines", *Agricultural Systems*, 89, 435-456.

- Pan, K.Y., Bilsborrow, R. E. (2005). “The use of a multilevel statistical model to analyze factors influencing land use: a study of the Ecuadorian Amazon”, *Global and Planetary Change*, 47, 232– 252.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2008). Análisis de los cambios de uso del suelo en la Comunidad de Madrid para el periodo de 1990-2000. *Scripta Nova*, Universidad de Barcelona. En revisión.
- Serra, P., Pons, X., Sauri, D. (2005). “Metodología para el análisis de las transformaciones paisajísticas de áreas rurales mediterráneas. Evolución, causas y consecuencias en el caso del Alto Ampurdán (Noreste de Cataluña)”, *Anales de Geografía* 25, pp. 259-278.
- Snijders, T. and Bóxer, R. (1999). *Multilevel Analysis. An introduction to Basic and advanced multilevel modelling*. SAGE Publications.
- Verburg, P. H., van Eck, J. R., de Nijs, T., Dijst, M. J., Schot, P. (2004a). “Determinants of land-use change patterns in the Netherlands”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31, 125-150.
- Verburg, P. H., de Nijs, T., van Eck, J. R., Visser, H., de Jong, K. (2004b). “A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns”, *Computers, Environment and Urban Systems*, 28, 667–690.
- Yang, Z., Chenghu, Z., Yongmin, Z. (2007). “A partial least-squares regression approach to land use studies in the Suzhou-Wuxi-Changzhou region”, *Journal of Geographical Sciences*, 17, 234-244.

Anexo 3

Incidencia de la zonificación del territorio en los factores explicativos del crecimiento urbano de la Comunidad de Madrid

Publicación:

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2009). “Incidencia de la zonificación del territorio en los factores explicativos del crecimiento urbano de la Comunidad de Madrid”, *XII Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica, Heredia, Costa Rica* y seleccionado para ser publicado en la *Revista Geográfica de America Central* en 2010.

RESUMEN

Se presenta un análisis de los posibles factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid durante el período 1990-2000, incluyendo la zonificación de la región en relación a las coronas metropolitanas en torno a la ciudad de Madrid. Se analizan las categorías estructura urbana laxa, urbanizaciones exentas y zonas industriales y comerciales establecidas en la cartografía de usos del suelo *Corine Land Cover*. Como factores explicativos se tomaron variables socioeconómicas, biofísicas, de planificación legal, políticas y de proximidad/accesibilidad, medidas en cada píxel del territorio. El análisis de la relación entre las variables explicativas y el crecimiento urbano se llevó a cabo a través de la regresión logística. Los resultados obtenidos del ajuste de los modelos mostró la relevancia de algunas variables en la explicación de la localización del crecimiento de las categorías urbanas analizadas.

Palabras clave: SIG, crecimiento urbano, variables explicativas, regresión logística, Madrid.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the explanatory factors of urban growth located in Madrid (Spain) during the period of 1990-2000, including the zoning of the region in relation to the crowns around the city of Madrid. Specifically, two categories were analyzed: residential discontinuous urban and residential discontinuous sparse urban, and commercial and industrial of the *Corine Land Cover*. Previous analysis of *Corine Land Cover* land use change identified these categories as having the largest growth during the study period. Socio-economic, biophysical, planning, policies and proximity/accessibility variables were taking in account as explanatory factors of urban growth, at pixel level. Logistic regression was used in order to analyze the relationship between explanatory variables and urban growth. Model adjustment showed that significance among variables varies considerably, this allows for the identification of the main explanatory variables of urban growth.

Keyword: GIS, urban growth, explanatory factors, logistic regression, Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de los factores que pueden ayudar a entender el rápido crecimiento de las zonas urbanas en todo el mundo es un tema de gran relevancia social y ambiental. En la Comunidad de Madrid (España) más de 30.000 has se han convertido en nuevas superficies artificiales entre 1990 y 2000, es decir cerca de un 50 % más de la superficie de ese tipo existente en 1990 (Plata, Gómez y Bosque, 2009). ¿Qué hechos y procesos pueden estar conectados con esta dinámica tan rápida?

Este crecimiento de las zonas artificiales (residenciales, industriales, comerciales) se ha producido en buena parte del territorio de la Comunidad, y en espacios cuyas características físicas o territoriales son muy distintas. En un trabajo anterior (Plata, Gómez y Bosque, 2008a) se han intentado determinar algunos factores que tengan una relación con este cambio, los resultados son útiles pero no totalmente concluyentes, una posible causa de algunas de las debilidades de esta relación entre factores explicativos y crecimiento urbano en Madrid, puede estar relacionada con las notables variaciones espaciales en el proceso de crecimiento urbano, por ello parece de utilidad repetir los análisis incluyendo ahora una zonificación del territorio madrileño.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es entender las causas de que unos puntos del territorio se urbanicen y otros no lo hagan, pero considerando la posible influencia de una zonificación del área de estudio que responde a ciertas características funcionales y socioeconómicas.

Históricamente el crecimiento de las ciudades había sido provocado por el crecimiento de la población. Sin embargo, en la actualidad, en lugares donde hay poca o ninguna presión demográfica, existen otra variedad de factores que influyen en el crecimiento de las ciudades. Al mismo tiempo el crecimiento urbano se ha acelerado en respuesta a la relación entre la mejoría en la red de transporte y la movilidad de la ciudadanía. Esto ha hecho posible vivir cada vez más lejos de la ciudad, reteniendo las ventajas de una posición de ciudad, o ha permitido a la gente vivir en una ciudad y trabajar en otra (EEA, 2006). Asimismo la composición de fuerzas incluye tendencias socioeconómicas tales como: los medios de transporte, el precio del suelo, tendencias demográficas, el atractivo de las áreas urbanas existentes y, no menos, la aplicación de políticas de planeamiento del uso del suelo a escalas locales y regionales. De este modo las

evidencias sugieren que donde no se realiza un planeamiento del crecimiento, el desarrollo descentralizado dominará y el crecimiento urbano ocurrirá de un modo automático.

En este sentido el análisis de los factores que interactúan con el crecimiento urbano proporcionará a los encargados de la planificación del territorio información de gran valor que debería utilizarse para la realización de políticas de urbanización congruentes, que tomen en cuenta la conservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible.

Por su parte, en este análisis se pretende obtener los factores que definen las pautas del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid aplicando técnicas estadísticas de análisis espacial y Sistemas de Información Geográfica, y una zonificación del área de estudio que nos permita determinar con más claridad los factores mas influyentes en el crecimiento de las categorías urbanas analizadas.

2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

2.1. Descripción del área de estudio

La Comunidad de Madrid se localiza en el centro de España y limita con las provincias de Guadalajara, Cuenca, Toledo, Ávila y Segovia (Figura 1). Se encuentra conformada por 179 municipios en una extensión territorial de 8.025 km² (INE, 2005). Su población estimada es de aproximadamente 6 millones de habitantes, gran parte de la cual se concentra en el área metropolitana, aunque a partir de la década de 1990 se evidenciaron fuertes procesos de descentralización hacia algunos municipios del oeste, norte y sureste de la región.

Dichos procesos han provocado que la Comunidad de Madrid se consolide como uno de los territorios de mayor dinamismo del arco mediterráneo, con un crecimiento de las superficies artificiales aproximado del 48 % durante la década de los 90, muy por encima del 25 % de crecimiento medio registrado en el territorio nacional y del 5,4 % de la Unión Europea (EEA, 2006; OSE, 2006). En este sentido las zonas urbanas han aumentado en 14.310 ha, de las cuales el 80 % corresponde al tejido urbano discontinuo (se pueden diferenciar varias categorías de zonas urbanas: además del Tejido Urbano Continuo (TUC), la Estructura Urbana Laxa (EUL), las Urbanizaciones Exentas y/o Ajardinadas (UEA) y las Zonas Industriales y Comerciales (ZIC) cada una con

diferentes porcentajes de crecimiento entre 1990 y 2000). Asimismo, López de Lucio (2003) señala que la región urbana de Madrid se transforma a una velocidad notable, configurándose un nuevo modelo territorial aquejado de serios problemas de sostenibilidad que han de ser corregidos mediante políticas públicas que reequilibren y redireccionen dichas dinámicas.

Por su parte, el sector industrial y comercial está caracterizado por una distribución espacial cada vez más extensa, dispersa y fragmentada, lo que conlleva a crecientes necesidades de transporte, tanto para los trabajadores y sobre todo para las mercancías (Gutiérrez Puebla, 2004; De Santiago, 2007). Esto a su vez también produjo una importante ampliación de la infraestructura de transporte, donde cabe mencionar que hacia el año 2000 la red vial alcanzaba aproximadamente 584 kilómetros de extensión mientras que la red de metro y ferrocarriles se acercaba a los 530 kilómetros, posicionándose como la segunda infraestructura de transporte más importante de la región (López de Lucio, 2003).

También se ha podido comprobar que factores como la accesibilidad a las zonas urbanas y a las carreteras, la densidad de población, la pendiente del terreno, la cercanía al centro de negocios de la Comunidad, entre otros, son relevantes a la hora de intentar obtener las lógicas que han guiado el crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid en la década de los 90's (Plata, Gómez y Bosque, 2008a y 2008b).

Aun cuando esto ocasiona amenazas tanto de sostenibilidad ambiental como social, los análisis prospectivos realizados con datos del planeamiento urbanístico indican que éstas tendencias continuarán en el futuro (Gutiérrez Puebla, 2004; Gutiérrez Puebla y García Palomares, 2005).

2.2. Zonificación del área de estudio

Ante la necesidad de obtener factores que puedan explicar el crecimiento de las zonas urbanas de forma clara se vio la necesidad de utilizar una zonificación para el análisis de la Comunidad. Al respecto se pueden decir que en la Comunidad de Madrid se han realizado estudios sobre diferentes temáticas, tales como: calidad del aire, estudios estadísticos, análisis socio-territoriales, de transporte, entre otros; y aplicando diferentes zonificaciones de la Comunidad.

Dentro de las más conocidas está la delimitación por unidades territoriales (NUTS) aplicada para fines estadísticos; o, la utilizada por el consorcio regional de transporte de Madrid la cual, incluso, excede los límites de la Comunidad. No obstante estas zonificaciones no toman en cuenta la dinámica espacial del territorio.

Con respecto a delimitaciones hechas con la finalidad de entender los procesos relacionados con la dinámica territorial de la Comunidad se puede hacer mención de la zonificación que plantea López de Lucio (2003), que divide la región madrileña en 11 subsistemas territoriales o comarcas con una clara identidad geográfica-funcional. Esto supuso la agrupación de municipios de acuerdo con un conjunto de criterios, tales como: características geográficas de sus territorios, su perfil funcional, los tipos y formas edificatorias principales y las características socioeconómicas comunes.

Asimismo en el Atlas de la Comunidad de Madrid en el umbral del siglo XXI, elaborado por la Consejería de Economía e Innovación Tecnológica de la Comunidad, se plantea una división más genérica de la región configurada por coronas metropolitanas, espacios claramente diferenciados por sus características funcionales y la condición socioeconómica de sus habitantes.

De este modo se optó por trabajar con dichas coronas metropolitanas, ya que éstas toman en cuenta la dinámica de los procesos de urbanización del espacio madrileño. Así, dichos procesos en el pasado se limitaban tan solo a la capital madrileña, apareciendo una nítida oposición entre la ciudad y el campo. Sin embargo, con los años dicho proceso desbordó esos límites configurando primero una pujante área metropolitana funcional y más recientemente una extensa corona periurbana en la que prácticamente se incluye en mayor o menor medida todo los núcleos no metropolitanos que hasta fechas recientes podían considerarse como rurales (García y Sanz, 2002).

La anterior zonificación permite diferenciar espacialmente las siguientes zonas:

Área metropolitana. Formada por el municipio de Madrid y una corona metropolitana. Así, el **Municipio de Madrid** se distingue por dos zonas, la denominada Almendra Central y otra formada por la Periferia madrileña. En la **Corona metropolitana** se destacan cuatro zonas, generadas por el progresivo crecimiento que el área metropolitana funcional ha venido teniendo en los últimos decenios. De este modo se

destacan al **norte** los municipios de Alcobendas, San Sebastián de los Reyes, Colmenar Viejo y Tres Cantos; al **oeste** se constituye por los municipios de Pozuelo de Alarcón, Majadahonda, Las Rozas, Boadilla del Monte, Villaviciosa de Odón, Villanueva de la Cañada, Villanueva del Pardillo y Brunete; la parte **sur** formada por los municipios de Alcorcón, Leganés, Getafe, Móstoles, Fuenlabrada, Parla y Pinto; y al **este** configurada por los municipios de Coslada, San Fernando de Henares, Torrejón de Ardoz, Alcalá de Henares, Paracuellos de Jarama, Mejorada del Campo, Velilla de San Antonio y Rivas-Vaciamadrid.

Por otro lado estarían los **espacios no metropolitanos** que comprenden el resto de municipios de la Comunidad de Madrid. En función del criterio de la distancia y la contigüidad espacial al área metropolitana funcional se ha distinguido entre una tercera, cuarta y quinta corona periurbana y el resto hasta el límite de la Comunidad.

Tomando como referencia dicha zonificación para estudiar la distribución del crecimiento urbano en la Comunidad, se observó que es la corona metropolitana donde se dan los mayores porcentajes de crecimiento para todas las categorías. No obstante, se puede verificar que las categorías Estructura Urbana Laxa (EUL) y Zonas Industriales y Comerciales (ZIC) tienen porcentajes considerables de crecimiento en el municipio de Madrid y en la Corona 3, mientras que la categoría Urbanizaciones Exentas y/o Ajardinadas (UEA) tiene una presencia importante en la corona 3, 4 y 5 (Tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de crecimiento de las categorías artificiales por coronas.

| Categoría | Municipio | Corona | | | | | Total |
|-----------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------|--------|
| | de Madrid | Metropolitana | Corona 3 | Corona 4 | Corona 5 | Resto CM | |
| EUL | 22,95 | 46,65 | 19,66 | 3,40 | 4,89 | 2,45 | 100,00 |
| UEA | 5,09 | 36,12 | 24,52 | 19,38 | 11,79 | 3,10 | 100,00 |
| ZIC | 16,22 | 61,36 | 17,90 | 3,09 | 1,29 | 0,14 | 100,00 |

Fuente. Obtenido del Corine Land Cover 1990 y 2000 y de las coronas del Atlas de la Comunidad de Madrid en el umbral del siglo XXI

Con la finalidad de realizar un análisis práctico de los factores explicativos del crecimiento urbano de la Comunidad de Madrid a nivel de píxel, se propone agregar dichas regiones en tres zonas, por considerar que los municipios que en ellas se agrupan han experimentado un crecimiento urbano con similares características: la primera zona que comprende al área metropolitana, es decir, el Municipio de Madrid y la corona metropolitana; la segunda zona que corresponde a la tercera corona, y a la cual se anexan los municipios que colindan con la carretera Nacional VI (Cercedilla,

Navacerrada, El Boalo, Los Molinos, Guadarrama, Collado Mediano, Alpedrete, Collado Villalba, San Lorenzo del Escorial y El Escorial); y la tercera zona que agrupa a la cuarta y quinta corona (a excepción de los municipios anexados a la segunda zona) y el resto de la Comunidad (Figura 1).

2.3. Datos. Análisis exploratorio de las variables disponibles

Las categorías artificiales que mayor crecimiento tuvieron en el período entre 1990 y 2000 en la Comunidad de Madrid son: las zonas urbanas (estructura urbana laxa y urbanizaciones exentas) y las zonas industriales y comerciales (Plata, Gómez y Bosque, 2009), que son tomadas en este estudio como variables dependientes (Figura 1 y Tabla 2).

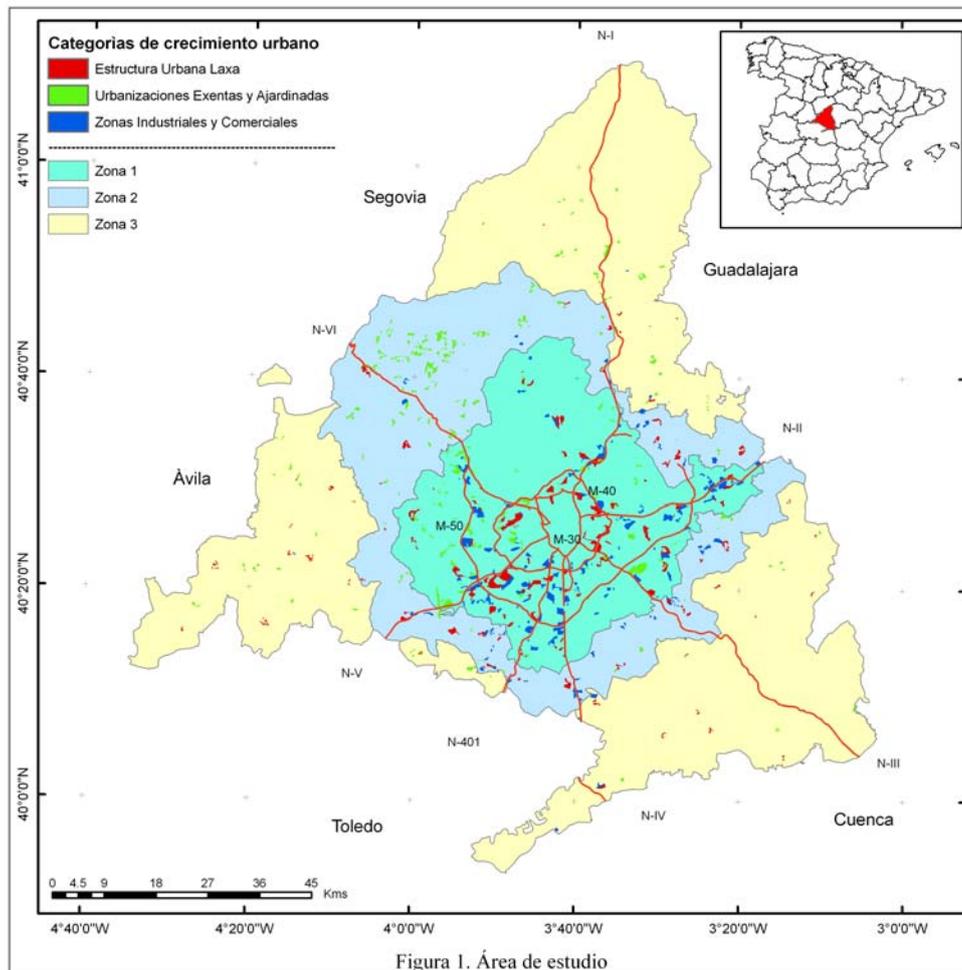


Figura 1. Zonificación del área de estudio

Fuente. Corine Land Cover 1990 y 2000. Adaptado de las coronas del Atlas de la Comunidad de Madrid en el umbral del siglo XXI.

Por otro lado, para la selección de las variables ó factores explicativos del fenómeno de expansión urbana, se tomó en consideración la literatura existente sobre este tipo de análisis, la disponibilidad de información y estudios previos realizados a nivel de la Comunidad (Plata, Gómez y Bosque, 2008a y 2008b). De este modo, como variables explicativas, y tomando como referencia el año 1990, se utilizaron para este estudio las 18 variables (de tipo socioeconómico, político, de planificación/políticas, proximidad/accesibilidad y biofísico) que resultaron ser las más significativas en los estudios previos mencionados (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de las variables dependientes e independientes utilizadas en el ajuste del modelo. Todas las variables que miden crecimientos o cambios se refieren al periodo 1990-2000. Las variables que muestran un valor se refieren al año 1990.

| Tipo de Variable | No. | Nombre de la variable | Descripción |
|-----------------------------------|-------------|--------------------------------|---|
| Crecimiento de zonas artificiales | I | ZU | Crecimiento de la categoría estructura urbana laxa y urbanizaciones exentas y/o ajardinadas |
| | II | ZIC | Crecimiento de la categoría zonas industriales y comerciales |
| Socio económicas | 1 | DensPob | Densidad de población (1990) |
| | 2 | PIncrViv | Incremento de número de viviendas (%) |
| | 3 | PIncrRenBruta | Incremento de renta bruta (%) |
| Planificación/ Políticas | 4 | Purbaniza | Porcentaje de superficie urbanizable |
| | 5 | Pcom | Porcentaje de suelo no urbanizable común |
| | 6 | PVotoIzq | Porcentaje de votos de izquierda |
| Proximidad/ Accesibilidad | 7 | Dist_Car | Distancia a Carreteras |
| | 8 | Dist_ZIC | Distancia a grandes superficies comerciales |
| | 9 | Dist_CentNeg | Distancia al CBD de Madrid |
| | 10 | Dist_Hid | Distancia a hidrografía |
| | 11 | DistUrb1990 | Distancia a zonas urbanas en 1990 |
| | 12 | Dist_Hosp | Distancia a hospitales |
| | 13 | Dist_Univ | Distancia a universidades |
| | 14 | Dist_NoDesea | Distancia a instalaciones no deseables |
| 15 | Dist_EspNat | Distancia a espacios naturales | |
| Biofísicas | 16 | OriSur | Píxeles con orientación Sur-suroeste |
| | 17 | Pendiente | Pendiente del terreno |
| | 18 | Altitud | Altitud del terreno |

De la zonificación realizada para el análisis (Figura 1), se pudo observar que los mayores porcentajes de crecimiento urbano se dieron en el área metropolitana (Zona 1), mientras que para las otras dos zonas se observaron porcentajes menores. Es de

señalarse que la categoría Urbanizaciones Exentas y Ajardinadas (UEA) tuvo un porcentaje de crecimiento alto en la Zona 3, principalmente, por el importante desarrollo de segundas residencias en la sierra madrileña (Tabla 3).

Tabla 3. Crecimiento de las categorías artificiales en las distintas zonas de estudio.

| Categoría | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Total |
|-----------|--------------|--------|--------------|--------|
| EUL | 69,60 | 19,66 | 10,74 | 100,00 |
| UEA | 41,21 | 24,52 | 34,27 | 100,00 |
| ZIC | 77,58 | 17,90 | 4,52 | 100,00 |

Por otro lado, los datos de la tabla 4 arrojan que el área metropolitana de Madrid (Zona 1) es la que presenta mayor presión demográfica, con un promedio de 2.354 hab/Km² en 1990, donde el municipio de Madrid alcanzó hasta los 5.000 hab/Km², aproximadamente. Por otro lado, el mayor porcentaje de incremento de la vivienda se encuentra en la tercera corona (Zona 2), seguidos por el área metropolitana (Zona 1) y la zona 3. También se observó que el incremento de la renta bruta se distribuye de manera regular en la zona 2 y 3 con porcentajes entre 44 y 47 %; no obstante en la zona 3 la renta bruta es menor (38 %), pero con una mayor variabilidad entre los municipio (SD = 10 %).

Tabla 4. Datos sobre algunas variables socioeconómicas para las distintas zonas de estudio

| Zonas | Densidad de población | | Incremento de vivienda | | Incremento de la renta bruta | |
|-------|-----------------------|---------|------------------------|-------|------------------------------|-------|
| | Media | SD | Media | SD | Media | SD |
| 1 | 2354,20 | 2108,21 | 45,53 | 53,73 | 44,71 | 5,96 |
| 2 | 105,28 | 136,91 | 84,61 | 57,34 | 47,51 | 6,30 |
| 3 | 43,63 | 95,98 | 45,99 | 44,73 | 38,55 | 10,01 |

Fuente. Elaboración propia a partir de datos del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid

En lo referente a la planificación del territorio se observó que las dos variables disponibles revelan que la zona metropolitana es la que cuenta con mayor superficie urbanizable, mientras que son las zonas 2 y 3 las que presentan mayores superficies de suelo no urbanizable, quizás debido a las figuras de protección de las áreas naturales. Asimismo, los mayores porcentajes de votos a partidos políticos de izquierda se encuentran en los municipios localizados en la zona 1 seguidos de la zona 2 y 3 (Tabla 5).

Tabla 5. Datos sobre algunas variables de planeamiento en las distintas zonas de estudio

| Zonas | Porcentaje de votos de izquierda | | Superficie Urbanizable | | Superficie No Urbanizable | |
|-------|----------------------------------|------|------------------------|------|---------------------------|-------|
| | Media | SD | Media | SD | Media | SD |
| 1 | 45,7 | 13,2 | 8,87 | 9,87 | 25,90 | 15,33 |
| 2 | 38,3 | 16,3 | 2,32 | 2,62 | 45,62 | 32,90 |
| 3 | 35,0 | 21,1 | 0,83 | 1,85 | 51,06 | 34,06 |

Fuente. Elaboración propia a partir de datos del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid y de la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio.

A su vez, las variables de proximidad nos dan una idea sobre la accesibilidad que tiene en promedio cada zona (Tabla 6 y 7). En este sentido se puede observar que las tres zonas poseen una accesibilidad a las carreteras y una cercanía a la red hidrográfica muy similar, no excediendo una media de 1.200 metros. En cuanto a la accesibilidad a las zonas urbanas se puede decir que: la zona 3, de carácter más rural, tiene una accesibilidad menor; mientras que la zona metropolitana posee una mayor accesibilidad a las zonas urbanas con una distancia promedio no mayor a los 1.200 metros, seguida de la zona 2.

Tabla 6. Variables de proximidad a infraestructuras

| Zonas | Distancia a carreteras | | Distancia a ZIC | | Distancia a zonas urbanas | |
|-------|------------------------|----------|-----------------|-----------|---------------------------|----------|
| | Media | SD | Media | SD | Media | SD |
| 1 | 1.181,26 | 1.194,33 | 3.739,41 | 3.434,62 | 1.119,37 | 1.141,62 |
| 2 | 1.177,61 | 1.062,84 | 8.170,17 | 5.360,65 | 1.533,73 | 1.190,06 |
| 3 | 1.059,32 | 935,26 | 17.117,59 | 11.338,14 | 2.199,15 | 1.536,65 |

Fuente. Elaboración propia a partir de datos del *Corine Land Cover* 1990 y 2000 y del Centro Nacional de Información Geográfica, España.

Por otro lado, todas las zonas se encuentran distribuidas de manera concéntrica al centro de negocios de Madrid, por lo cual dicha accesibilidad disminuye desde la zona 1 hasta la zona 3, siendo la primera la de mayor accesibilidad y la última la de menor accesibilidad (Tabla 7).

Tabla 7. Variables de proximidad

| Zonas | Distancia a CBD | | | | Distancia a hidrografía | |
|-------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|----------|
| | Min | Max | Media | SD | Media | SD |
| 1 | 0,00 | 37.410,83 | 17.471,89 | 7.148,67 | 1.153,70 | 1.106,64 |
| 2 | 17.305,06 | 52.016,46 | 32.928,07 | 7.400,41 | 973,76 | 838,47 |
| 3 | 24.684,26 | 84.189,13 | 49.008,30 | 12.326,63 | 1.054,99 | 869,27 |

Fuente. Obtenido a partir de datos del Centro Nacional de Información Geográfica, España.

Respecto a las variables biofísicas, se puede decir que las zonas 2 y 3 se encuentran en altitudes y pendientes medias similares, mientras que la zona 1 se ubica en la parte más llana de la Comunidad con una altitud media no mayor a los 665 metros y una pendiente media no mayor al 2,20 %. Por su parte, se observa que en cuanto a la orientación del terreno es la zona 1 la que presenta una orientación menos idónea para el desarrollo de urbanizaciones, mientras que la zona 2 y 3 presentan orientaciones del terreno similar y más ideal para las urbanizaciones en nuestras latitudes, orientación sur-suroeste (Tabla 8).

Tabla 8. Variables biofísicas

| Zonas | Orientación | | Altitud | | Pendiente | |
|-------|-------------|-------|---------|--------|-----------|------|
| | Media | SD | Media | SD | Media | SD |
| 1 | 97,6 | 107,0 | 664,52 | 81,37 | 2,18 | 2,96 |
| 2 | 132,6 | 108,7 | 857,28 | 293,90 | 5,19 | 6,43 |
| 3 | 141,9 | 110,0 | 873,23 | 331,64 | 6,38 | 6,73 |

En cuanto a la accesibilidad a los servicios (universidades y hospitales) se observa que la zona 1 tiene una mejor accesibilidad, disminuyendo gradualmente hasta la zona 3. En lo que respecta a las instalaciones no deseables, éstas se encuentran a una distancia media menor en la zona 1 y aumentan proporcionalmente hasta la zona 3. No obstante, para la proximidad a los espacios naturales se pudo observar que estos tienen las menores distancias, siendo muy semejantes en la zona 1 y 2 y aumentando hasta el doble para la zona 3 (Tabla 9).

Tabla 9. Variables biofísicas

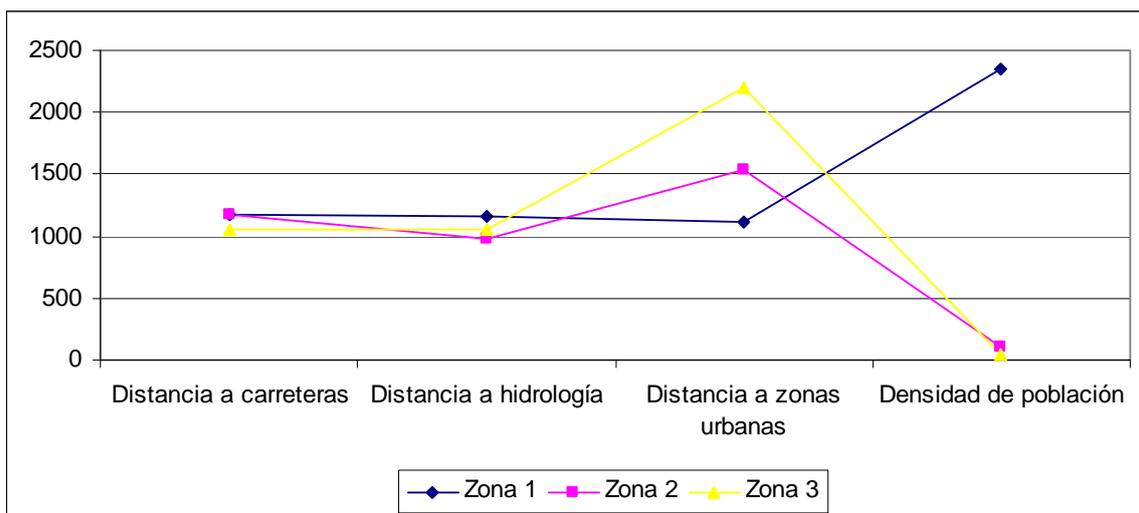
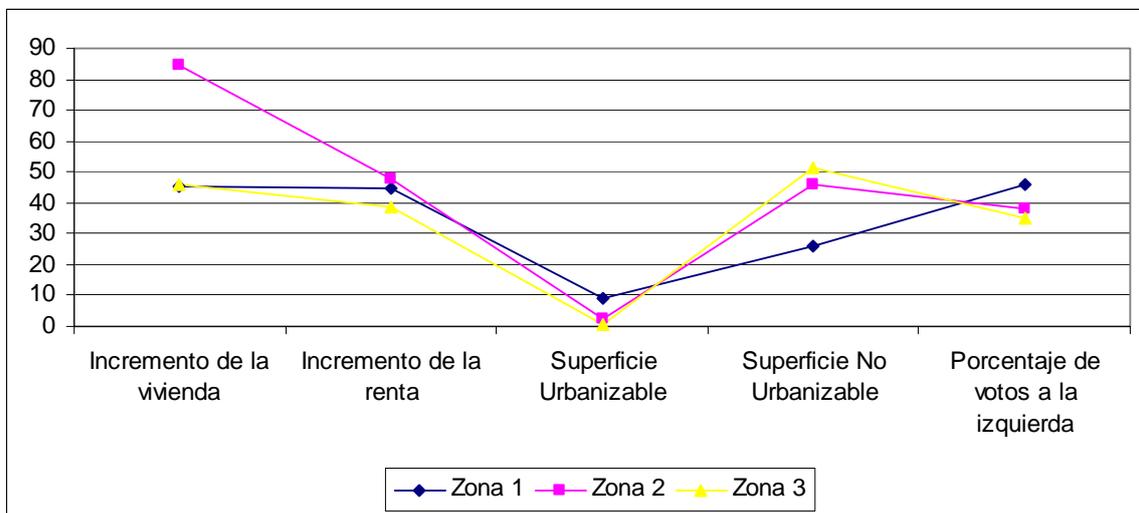
| Zonas | Distancia a hospitales | | Distancia a universidades | | Distancia a instalaciones no deseables | | Distancia a espacios naturales | |
|-------|------------------------|-----------|---------------------------|-----------|--|-----------|--------------------------------|-----------|
| | Media | SD | Media | SD | Media | SD | Media | SD |
| 1 | 9.132,32 | 5.049,61 | 7.822,56 | 4.489,51 | 6.109,56 | 5.499,359 | 8.165,77 | 6.254,92 |
| 2 | 13.885,58 | 6.640,93 | 20.792,11 | 8.619,06 | 14.534,12 | 10.192,95 | 8.564,42 | 8.140,778 |
| 3 | 30.325,29 | 14.546,12 | 36.022,45 | 12.515,55 | 17.279,59 | 16.109,79 | 16.400,97 | 9.770,59 |

2.4. Análisis estadístico de la media de las variables por zona

Con la finalidad de tener certidumbre en la elección de las zonas elegidas, se realizó un análisis estadístico del conjunto de variables disponibles que nos permitiera determinar si dichas variables se comportan de manera significativamente diferente en cada zona.

Para ello se utilizó una prueba *t* de *Student* para dos muestras, con un grado de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$).

Los resultados obtenidos nos llevan a la conclusión de que existen evidencias estadísticas para confirmar que las zonas poseen un comportamiento diferente en cuanto a la variación espacial de sus variables. La comparación de las medias de las variables por zonas no arrojan *P-valores* $< 0,05$, excepto para la variable orientación del terreno que se comporta de forma similar en la zona 2 y 3 ($P = 0,96$). También de la figura 2 se pueden observar los valores medios de las variables utilizadas en el presente trabajo, y sus variaciones, en bastantes casos muy importantes, entre las tres zonas de Madrid.



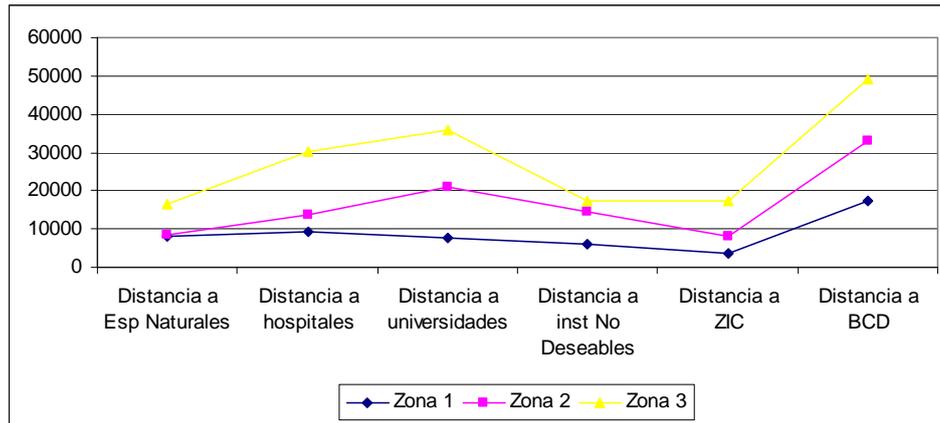


Figura 2. Comparación gráfica de los valores medios de las variables por zona

Visto los resultados pasaremos a hacer un análisis para establecer el poder explicativo que tienen dichas variables sobre el crecimiento de las zonas urbanas, comerciales e industriales.

3. METODOLOGÍA. REGRESIÓN LOGÍSTICA ESPACIAL

Como método de análisis estadístico para determinar las lógicas que guiaron el crecimiento urbano de la Comunidad de Madrid se utilizó la regresión logística (Conway, 2005; Cheng y Masser, 2003; Hu y Lo, 2007). Dicha metodología se establece en base a la siguiente ecuación:

$$\log it \left[\frac{Y=1}{Y=0} \right] = \frac{P}{1-P} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

Donde: β son los parámetros estimados por el modelo; x_1, x_2, \dots, x_k son las variables explicativas incluidas en el modelo; y P es la probabilidad de que un píxel se transforme a urbano.

Una vez recopiladas todas las variables independientes se realizó un análisis de correlación, omitiendo aquellas que presentaban correlaciones bivariadas mayores de 0,80 (Cheng y Masser, 2003; Bocco, Mendoza y Masera, 2000).

Por otro lado, para disminuir posibles problemas de autocorrelación y dependencia espacial, los modelos se ajustaron tomando una muestra (Hu y Lo, 2007; Verburg et al, 2004; Cheng y Masser, 2003; Conway, 2005). Dicha muestra se diseñó de tal forma que, el total de píxeles de crecimiento urbano (valores de 1) y de píxeles de no

crecimiento urbano, (valores de 0) fueran aproximadamente iguales (Cheng y Masser, 2003). Se excluyen del análisis las superficies artificiales, los ríos, embalses y lagos existentes en 1990.

De este modo se ajustaron 2 modelos de regresión logística espacial para cada zona utilizando en ellos todo el conjunto de variables seleccionadas. En total fueron 6 los modelos ajustados. La validación de los modelos se llevó a cabo con el estadístico *ROC* (Pontius y Schneider, 2001; Pontius y Batchu, 2003) y a través del porcentaje de píxeles clasificados correctamente (*PCCI*).

4. RESULTADOS

De la tabla 10 se puede observar que los ajustes de los modelos son relativamente buenos oscilando los valores del *ROC* entre 0,89 y 0,95 y el *PPCC1* entre 66 y 94 %.

En primer lugar si tenemos en cuenta a los coeficientes estandarizados obtenidos en el ajuste de los modelos podemos observar que al menos se obtienen 6 variables relevantes en la explicación de dicho crecimiento para cada zona.

Dentro de dichas variables se pudo observar, en general para las 3 zonas, que existe una correlación negativa entre el crecimiento urbano y la proximidad a: las zonas urbanas, los hospitales, al centro de negocios de la Comunidad y a las carreteras. Esto nos revela la importancia de la accesibilidad a la hora de proyectar nuevos desarrollos urbanísticos. Lo contrario se observa solamente para la proximidad a universidades, debido principalmente a la localización de las grandes universidades en el año 1990.

Deteniéndonos en el análisis por zona observamos que la distancia a instalaciones no deseables presenta una correlación considerable de forma negativa en la zona 2, mientras que para la zona 1 se presenta de forma positiva, aunque en menor medida.

Asimismo, en la zona 3 se observa como el desarrollo de las zonas urbanas se presenta en mayor medida en terrenos con pendientes suaves y altitudes considerables. También se puede mencionar que en dicha zona la proximidad a las zonas industriales y comerciales presenta una relación positiva con el crecimiento urbano. Este resultado quizás se dé por la ubicación de las segundas residencias en la sierra norte de Madrid, en terrenos llanos, en zonas altas y lejos de las grandes zonas industriales y comerciales,

tratando de buscar el *relax* que puede ofrecer las zonas rurales, sin olvidar las cuestiones de accesibilidad, como se mencionó anteriormente.

De la misma forma se encuentra correlacionada la proximidad a la red hidrográfica con el crecimiento de las zonas urbanas en la zona 1, mientras que en la zona 2 y 3 se produce lo contrario, aunque con menor influencia.

A su vez las zonas industriales y comerciales, en general para las 3 zonas, presentan una correlación negativa con variables, tales como: la distancia a las carreteras, la distancia a las zonas urbanas, la pendiente y la distancia al centro de negocios de la Comunidad. También otras variables se manifiestan del mismo modo, pero solamente para la zona 2 y 3, tales como: el porcentaje de suelo no urbanizable común, la distancia a hospitales, la proximidad a las instalaciones no deseables y la altitud del terreno. En la zona 3 se observa como la distancia a universidades presenta una correlación alta positiva con el desarrollo de las zonas industriales y comerciales. Lo anterior nos revela, en parte, como la maximización del beneficio económico para los empresarios es uno de los principales aspectos a tomar en cuenta a la hora de ubicar nuevas zonas industriales y comerciales.

Tabla 10. Resultado del ajuste de los modelos de regresión logístico

| Variables | Zonas Urbanas | | | Zonas Industriales y Comerciales | | |
|-------------------|---------------|--------------|--------------|----------------------------------|--------------|--------------|
| | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 |
| Intercepto | 8,66 | 5,89 | 1,41 | 4,80 | 9,88 | 6,86 |
| DENSPOB | -0,10 | -0,05 | 0,05 | -0,05 | 0,12 | 0,12 |
| INCVIV | 0,12 | 0,05 | 0,01 | 0,03 | -0,06 | 0,10 |
| INCREMENT | -0,02 | -0,03 | 0,05 | -0,08 | 0,04 | -0,07 |
| URBANIZABLE | 0,03 | 0,10 | 0,02 | -0,01 | 0,02 | 0,00 |
| URBCOM | 0,04 | -0,11 | 0,07 | 0,04 | -0,16 | -0,25 |
| PVOTOIZQ | 0,04 | 0,00 | -0,04 | -0,02 | -0,04 | 0,01 |
| Dist_car | -0,12 | -0,33 | -0,29 | -0,20 | -0,56 | -0,66 |
| DIST_ZIC | -0,06 | 0,12 | 0,17 | -0,18 | 0,06 | -0,43 |
| Dist_sol | -0,18 | -0,23 | -0,21 | -0,07 | -0,23 | -0,29 |
| DIST_HIDROL | 0,17 | -0,07 | -0,05 | 0,08 | 0,05 | 0,00 |
| DIST_URB1990 | -0,66 | -0,56 | -0,90 | -0,31 | -0,08 | -0,20 |
| DIST_HOSP90 | -0,40 | -0,18 | -0,05 | 0,08 | -0,27 | -0,35 |
| DIST_UNIVER90 | 0,35 | 0,39 | 0,09 | -0,10 | 0,13 | 0,52 |
| Dist_nodeseables | 0,14 | -0,35 | -0,11 | 0,06 | -0,38 | -0,35 |
| Dist_Nat1990 | -0,10 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | -0,05 | 0,03 |
| Ori_Sur | 0,01 | -0,07 | -0,03 | 0,03 | -0,08 | -0,03 |
| PENDI | 0,01 | -0,06 | -0,20 | -0,05 | -0,43 | -0,30 |
| ALTURAS | -0,10 | 0,10 | 0,19 | 0,02 | -0,27 | -0,37 |
| ROC | 0,89 | 0,91 | 0,93 | 0,91 | 0,91 | 0,95 |
| PPCC1 | 93,65 | 90,28 | 79,91 | 80,39 | 80,39 | 66,67 |

Auxiliándonos de la gráfica de probabilidad (Figura 3), se puede observar como algunas variables muestran un comportamiento claro en cuanto a su influencia en el cambio de las categorías analizadas.

Específicamente para la zona 1 se observa como a medida que aumenta la distancia a las zonas urbanas y a los hospitales, así como la altitud del terreno, la probabilidad de que un píxel pase a urbano disminuye. Del mismo modo ocurre para las zonas industriales y comerciales, donde se observa que a mayor aumento de la distancia a: carreteras, zonas urbanas, universidades; y con el aumento de la pendiente del terreno y de la renta bruta decrece la posibilidad de que proliferen dichas superficies artificiales (Figura 3).

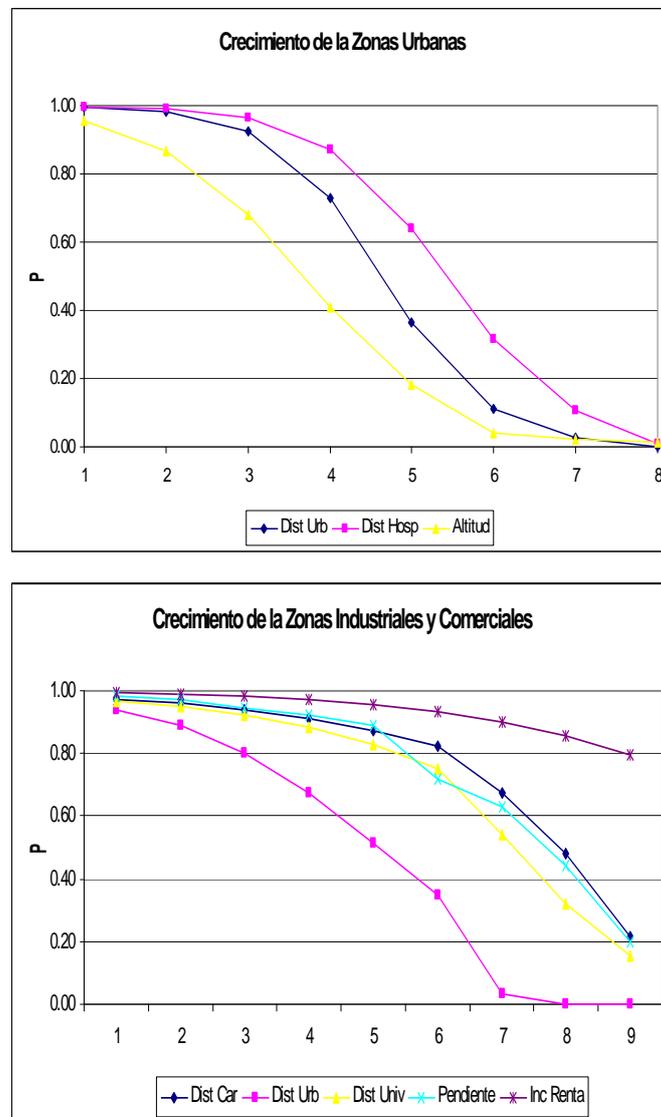


Figura 3. Probabilidad de desarrollo de zonas urbanas, industriales y comerciales en la Zona 1

Del mismo modo se observa que en la zona 2 las probabilidades de que aparezcan nuevas zonas urbanas disminuye con el aumento de la distancia a: las carreteras, al centro de negocios, a las zonas urbanas, a los hospitales y a las instalaciones no deseables. Asimismo, en el caso de las zonas industriales y comerciales con el aumento de la distancia a las carreteras, a hospitales, a instalaciones no deseables, de la pendiente y la altitud disminuye la ocurrencia de dichas superficies (Figura 4).

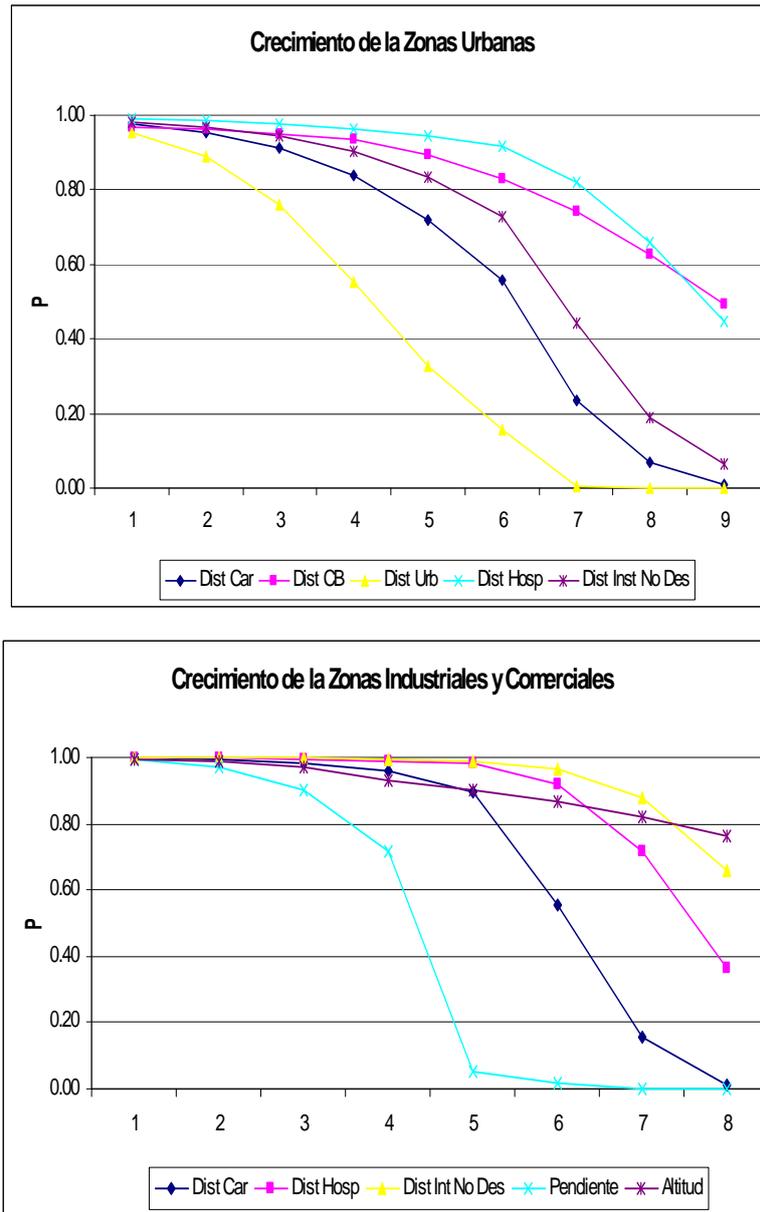


Figura 4. Probabilidad de desarrollo de zonas urbanas, industriales y comerciales en la Zona 2

No obstante, en la zona 3 ocurren procesos diferentes a los observados en las otras zonas (Figura 5). En primer lugar, se observa un comportamiento en las variables espacializadas a nivel de municipio donde se puede apreciar que con el aumento de la densidad de población, del incremento de la renta y las viviendas aumenta la probabilidad del desarrollo urbano. En el caso del porcentaje de superficie no urbanizable común ocurre lo contrario a lo esperado, es decir, era de esperarse que a mayor superficie no urbanizable por municipio menor probabilidad de que el territorio se urbanice. No obstante, como se observa de la gráfica, los resultados dan indicios de que en esta zona la probabilidad aumenta conforme aumenta el porcentaje de superficie no urbanizable. Otro dato interesante es el comportamiento que presenta la variable porcentaje de votos a los partidos de izquierda, donde se observa que a mayor porcentaje de votos disminuye la probabilidad de que se urbanice el territorio (Figura 5a).

También existen un conjunto de variables que se correlacionan de forma negativa con el crecimiento urbano en esta zona, tales como: la distancia a carreteras, a zonas urbanas, a las instalaciones no deseables, al centro de negocios, a la red hidrográfica y también con la pendiente del terreno (Figura 5b).

Asimismo se presenta variables con correlaciones positivas con el crecimiento urbano, tales como: la distancia a espacios naturales y a las universidades (Figura 5c).

En el caso de las zonas industriales y comerciales se pudo observa que en esta zona solo las variables distancia a carreteras, distancia al centro de negocios y la pendiente tienen una influencia relevante con la proliferación de dichas categorías (Figura 5d).

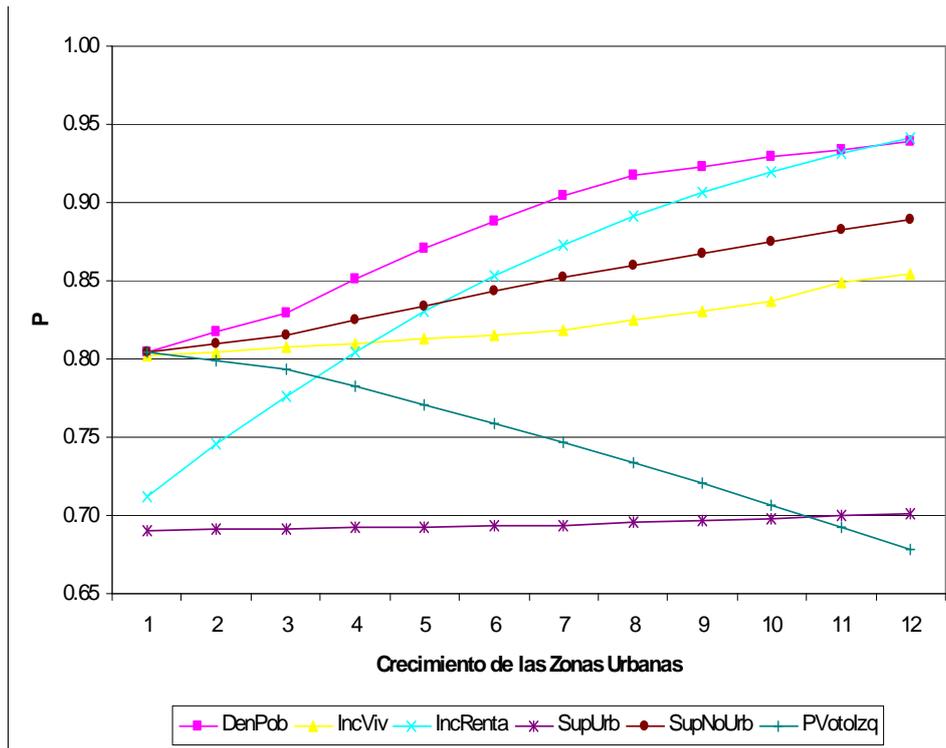


Figura 5a. Desarrollo de zonas urbanas tomando las variables a nivel municipal

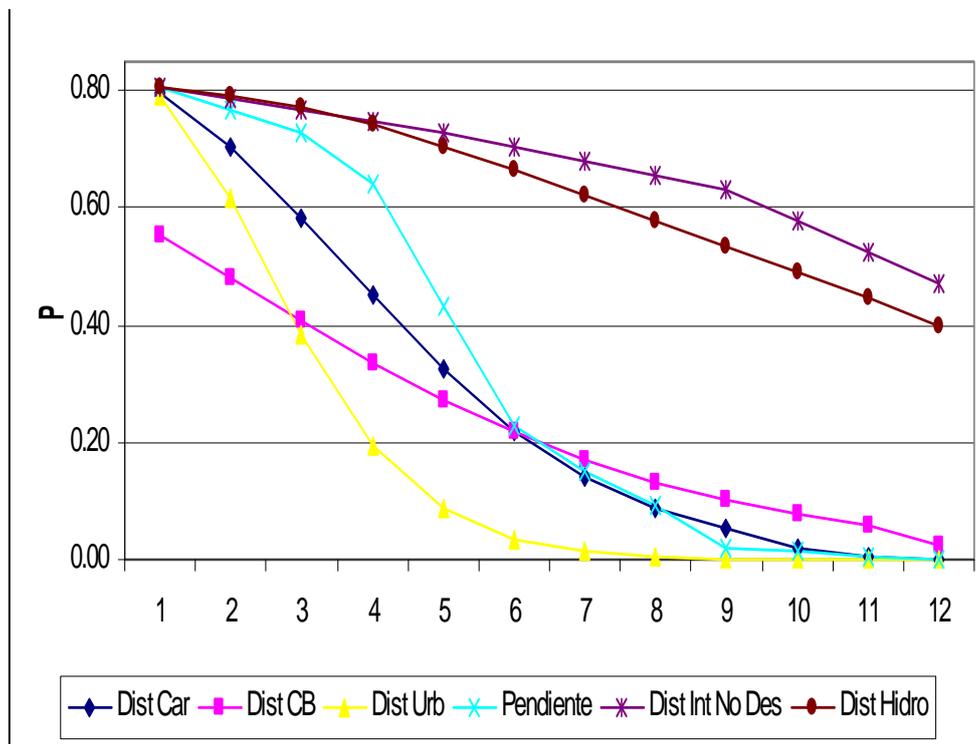


Figura 5b. Variables correlacionada de forma negativa con el crecimiento urbano

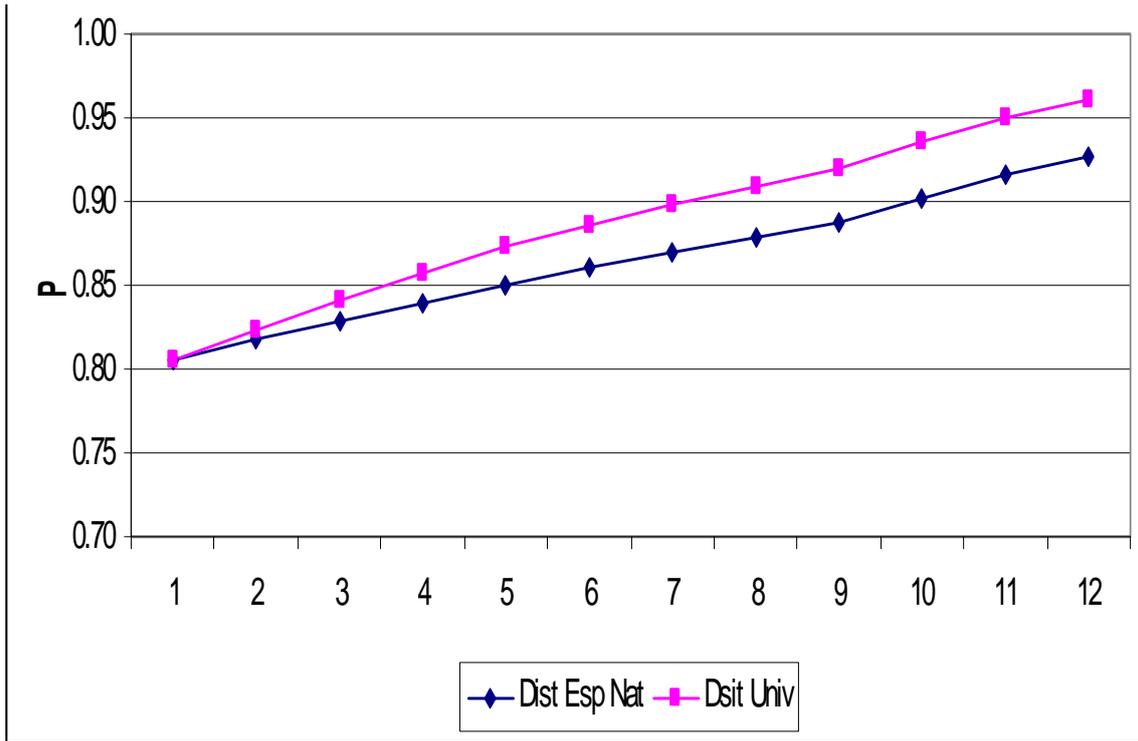


Figura 5c. Variables correlacionada de forma positiva con el crecimiento urbano

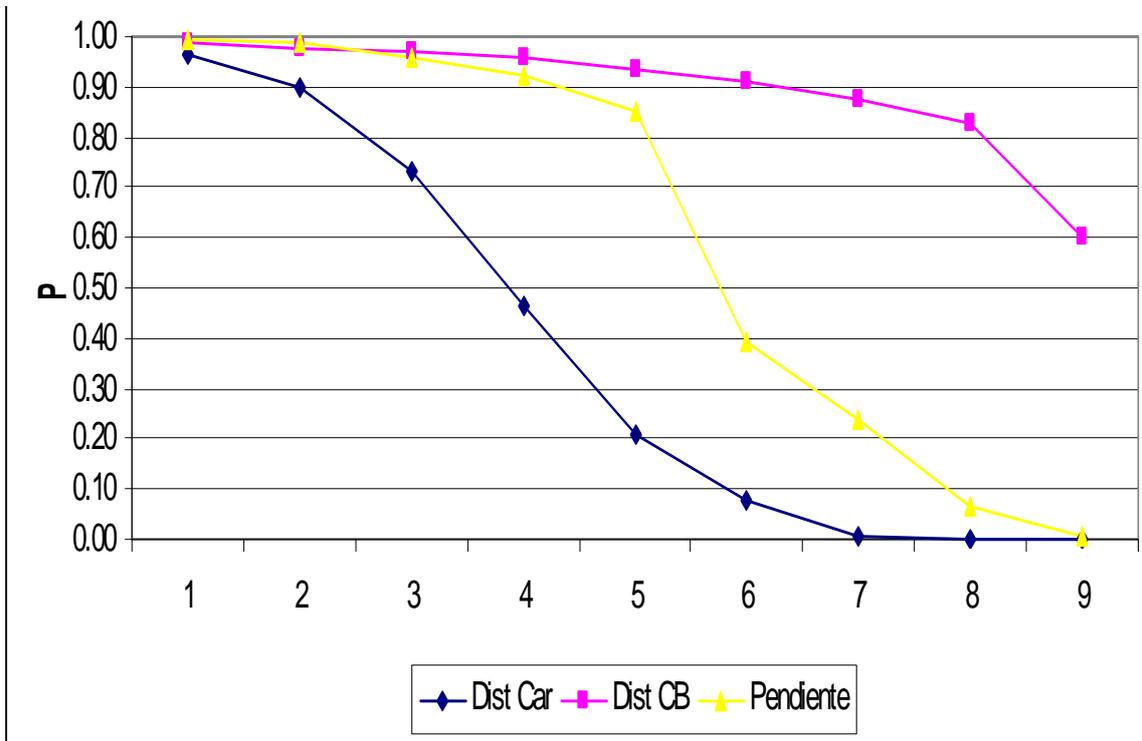


Figura 5d. Variables correlacionada de forma positiva con el crecimiento de las zonas industriales y comerciales

Figura 5. Probabilidad de crecimiento de las categorías analizadas para la Zona 3

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Retomando el antecedente de los resultados obtenidos en el trabajo de Plata, Gomez y Bosque (2008 a y b) se puede aseverar que, en general, los resultados obtenidos son similares. Esto es debido a que variables como la proximidad a zonas urbanas, carreteras, al centro de negocios, la pendiente y altitud del terreno siguen teniendo un peso importante en la localización de dichas categorías.

No obstante, en dicho trabajo se observaba como las variables espacializadas a nivel municipal respondían a unas lógicas para todo el territorio en general (Plata, Gómez, y Bosque, 2008b), y aquí si bien en la zona 2 y 3 se sigue observando una lógica similar, en la zona 3 su comportamiento es un tanto diferente, ya que la variabilidad de la información es menor (ver tabla 10, intercepto = 1,41). Asimismo, se pudo observar que las variables utilizadas tienen pesos diferentes para las zonas estudiadas e incluso, en algunos casos, signos opuestos.

También se puede señalar que la Comunidad de Madrid en los últimos 15 años ha estado inmersa en una vertiginosa dinámica espacial de sus usos del suelo, en particular debido al crecimiento urbano, y en donde las lógicas que los han guiado han sido muy diversas e incluso algunas inmedibles, como la especulación, lo cual hace que, en principio, los factores que deben explicar el crecimiento urbano no respondan, en algunas ocasiones, a lo esperado, aun cuando se trabajó con zonas definidas tomando en cuenta la dinámica de los procesos de urbanización del espacio madrileño.

Por último se puede señalar que el uso de las técnicas estadísticas de análisis espacial implementadas en los Sistemas de Información Geográfica es una potente herramienta para el análisis de los factores que influyen en los cambios de uso del suelo, en general y en el crecimiento urbano, en particular.

6. BIBLIOGRAFÍA

Bocco, G., Mendoza, M., Masera, O. (2000). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 44: 18-38.

Cheng, J., & Masser, I. (2003). Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China. *Landscape and Urban Planning*, 62: 199-217.

- Conway, M. (2005). Current and future patterns of land-use change in the coastal zone of New Jersey. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32, 877-893.
- De Santiago, R. E. (2007). Madrid, ciudad única. Pautas y lógicas espaciales recientes en la región madrileña: las grandes transformaciones estructurales; el despliegue del nuevo paradigma único en la región urbana de Madrid. *Urban*, 12, 8-33
- European Environment Agency (2006). *Urban sprawl in Europe, the ignored challenge*. EEA Report No. 10/2006.
- García, A. & Sanz, B. (2002). *Atlas de la Comunidad de Madrid en el umbral del siglo XXI. Imagen socioeconómica de una región receptora de inmigrantes*. Editorial Complutense, S.A. España.
- Gutiérrez Puebla, J., (2004). Producción de suelo industrial en la Comunidad de Madrid. *Anales de Geografía*, 24, 169-192.
- Gutiérrez Puebla, J. & García Palomares, J. C., (2005). Cambios en la movilidad en el área metropolitana de Madrid: el creciente uso del transporte privado. *Anales de Geografía*, 25, 331-351.
- Hu, Z., & Lo, P., (2007). Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31, 667-688.
- Instituto Nacional de Estadística (2005). Demografía y población. <http://www.ine.es/inebase/>, (última consulta: 26/03/2009).
- López de Lucio, R. (2003). Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid. *Urban*, 8, 124-161.
- Observatorio de la Sostenibilidad en España (2006). *Cambios de ocupación del suelo en España, implicaciones para la sostenibilidad*, Observatorio para la Sostenibilidad en España, Alcalá de Henares, Madrid, impreso por Artes Gráficas Cuestas S. A.
- Plata, W., Gómez, M., Bosque, J. (2008a). Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos y SIG. *XIII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, pp. 121-134.
- Plata, W., Gómez, M., Bosque, J. (2008b). Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la Comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos (RLO y MLA) y SIG. *Revista de Planeamiento Territorial y Urbanismo Iberoamericana*, 2. [http://www.planeamientoyurbanismo.com/articulos/21/analisis-de-factores-explicativos-del-crecimiento-urbano-en-la-comunidad-de-madrid-a-traves-de-metodos-estadisticos-\(rlo-y-mla\)-y-sig](http://www.planeamientoyurbanismo.com/articulos/21/analisis-de-factores-explicativos-del-crecimiento-urbano-en-la-comunidad-de-madrid-a-traves-de-metodos-estadisticos-(rlo-y-mla)-y-sig), (última consulta:26/03/2009).
- Plata, W., Gómez, M., Bosque, J. (2009). Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta-Nova*, (en prensa).
-

- Pontius, R. G., & Schneider, L. C. (2001). Land cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 239–248.
- Pontius, R. G., & Batchu, K. (2003). Using the relative operating characteristic to quantify certainty in prediction of location of land cover change in India. *Transactions in GIS*, 7 (4), 467-484.
- Verburg, P. H., van Eck, J. R., de Nijs, T. C., Dijst, M. J., Schot, P. (2004). Determinants of land-use change patterns in the Netherlands. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31, 125-150.

Capítulo 4

Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica

Publicación:

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (En prensa). “Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica”, *Geofocus* 10, pp. 103-134.

RESUMEN

La región de Madrid es considerada uno de los focos críticos de la Unión Europea en lo que a desarrollo urbano se refiere, debido al intenso crecimiento urbano disperso que se ha producido en los últimos 15-20 años. En el presente trabajo se explora la elaboración de modelos de crecimiento urbano óptimos basados en técnicas de Evaluación Multi-Criterio y Sistemas de Información Geográfica para simular la localización óptima de zonas residenciales, comerciales e industriales en la Comunidad de Madrid para el año 2000 (partiendo de los datos reales de 1990) y para el año 2020 (partiendo de los datos reales del año 2000 y de los resultados de crecimiento “óptimo” obtenidos para ese mismo año). Para ello se incluyeron hasta 15 factores relacionados con aspectos ambientales, sociales y económicos, con el ánimo de generar propuestas de futuro que tengan en cuenta los tres principales componentes del desarrollo sostenible. Los resultados obtenidos muestran, en general, patrones de crecimiento más compactos, junto a núcleos urbanos de tamaño medio e intermedio y en zonas de escaso valor ambiental o poco valor productivo.

Palabras clave: Planificación, SIG, EMC, asignación óptima de usos del suelo, crecimiento urbano, Madrid.

ABSTRACT

The region of Madrid is considered one of the hot-spots in urban development of the European Union, due to the intense dispersed urban growth produced in the last 15-20 years. In the present work it is explored in the elaboration of normative models based on techniques of Multi-Criteria Evaluation and Geographic Information System to simulate the optimal location of residential, commercial and industrial zones in the Community of Madrid between years 1990, 2000 and 2020. For it they were included up to 15 factors related to environmental, social and economic aspects, with the interest to generate future proposals that consider the three main components of the sustainable development. The results show more compact patterns of growth, next to urban nucleus of medium and inter-medium size and in zones of little environmental value or little productive value.

Key words: Planning, GIS, MCE, optimal allocation of land uses, urban growth, Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

Es sabido que uno de los factores que ha influido de manera decisiva en los cambios de uso del suelo es, sin duda, el crecimiento acelerado de las superficies artificiales, provocando efectos importantísimos en la alteración del medioambiente a escala local, regional y global.

Ante esto, se han venido proponiendo diferentes alternativas para corregir o disminuir el impacto que producen las nuevas zonas urbanas sobre el territorio, asumiendo que son las ciudades donde se concentran y generan los principales problemas de contaminación, pero también considerándolas como un potencial motor impulsor de un desarrollo económico y social sostenible.

Paralelamente se ha venido dando un arduo debate sobre el crecimiento urbano y su sostenibilidad, observándose que los patrones compactos de crecimiento urbano pueden ayudar a reducir el consumo de energía y los recursos naturales (Yeh y Li, 2001; Rueda, 2002). También en los últimos años las propuestas de planificación urbana intentan evitar el crecimiento en forma de mancha de aceite, así como el crecimiento difuso o *urban sprawl*, proponiéndose como una perspectiva más funcional el desarrollo policéntrico de las ciudades -lo cual implica potenciar los núcleos y no los ejes- y la formación de redes regionales de ciudades como uno de los principios o directrices para conseguir un desarrollo territorial sostenible, cohesionado económica y socialmente, que abra nuevas posibilidades en la relación entre espacios rurales y urbanos (Comisión Europea, 1999).

Asimismo, y mediante la incorporación, no solo de criterios económicos, sino también de criterios ambientales y sociales en los procesos de planificación, se está caminando hacia un desarrollo territorial sostenible, el cual pretende: “*alcanzar un equilibrio a largo plazo entre el desarrollo económico, la protección del medio ambiente, el uso eficiente de los recursos y la equidad social*” (citado por Diamantini y Zanon, 2000; Liu *et al.*, 2007; Ligmann-Zielinska *et al.*, 2008; Salado García y otros, 2008).

A la par, ha surgido una creciente necesidad de desarrollo de herramientas informáticas que den apoyo a los procesos de planificación del territorio (MacDonald y Faber, 1999; Pettit, 2002). En este sentido, en las dos últimas décadas el desarrollo de nuevas técnicas y metodologías, así como la adaptación de las existentes, han tenido gran relevancia en la

simulación de modelos espaciales para la ayuda a la toma de decisiones (Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005; López Vázquez y otros, 2008).

En este contexto, las técnicas de Evaluación Multi-Criterio (EMC) han demostrado sobradamente su eficiencia a la hora de diseñar modelos “óptimos” territoriales, ya que consideran la adecuación y aptitud que presenta el territorio para que sobre él se desarrolle una determinada actividad (residencial, industrial, comercial, etc.). Además, permiten plantear una combinación de diferentes criterios (por ejemplo: ambientales, sociales y económicos) que posibilitan la inclusión en los modelos desarrollados de ciertos principios de sostenibilidad. Estas técnicas vienen siendo aplicadas a diferentes actividades tales como: asignación de uso de suelo, localización de instalaciones no deseables, zonificación de corredores ambientales y áreas naturales (Paegelow y otros, 2003; Svoray *et al.*, 2005; Molero Melgarejo y otros., 2007; Geneletti y van Duren, 2008; Giordano y Riedel, 2008; Chang *et al.*, 2008). Del mismo modo, su aplicación ha sido de gran interés en la evaluación de la aptitud o capacidad del territorio para acoger nuevas urbanizaciones y grandes áreas industriales y comerciales (Barredo Cano, 1996; Wu y Webster, 1998; Barredo Cano y Bosque Sendra, 1999; Jiang y Eastman, 2000; Malczewski, 2002 y 2006a; Al-Shalabi *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2007; Ligmann-Zielinska, *et al.*, 2008).

Deteniéndonos en las técnicas de EMC disponibles, está demostrado que la sumatoria lineal ponderada (WLC, *Weight Lineal Combination*) y el método de jerarquías analíticas (AHP, *Analytic Hierarchy Process*) son los más utilizados en la asignación de usos del suelo (Malczewski, 2004). Si bien últimamente se han venido aplicando técnicas de EMC borrosas (Yager y Kelman; 1999; Jiang y Eastman, 2000; Malczewski, 2002; Phua y Minowa, 2005; Malczewski, 2006b; Baja *et al.*, 2007; Chang *et al.*, 2008; Boroushaki y Malczewski, 2008), éstas presentan todavía ciertas limitaciones, especialmente cuando se trabaja con una gran cantidad de factores en los modelos.

En cuanto a la selección de los factores utilizados para modelar los usos del suelo, comúnmente se utilizan variables espaciales relacionadas con criterios económicos, de localización, sociales y ambientales, tales como, proximidad a: zonas urbanas, áreas industriales, instalaciones no deseables, carreteras, aeropuertos, cuerpos de agua, parques, bosques, humedales; variables relacionadas con el precio del suelo, densidad de población, usos del suelo y clasificación del suelo; pendiente, altitud y orientación del terreno, calidad

visual, etc. (Wu y Webster, 1998; Jiang y Eastman, 2000; Malczewski, 2002; Al-Shalabi *et al.*, 2006; Malczewski, 2006a; Liu *et al.*, 2007; Molero Melgarejo y otros., 2007; Boroushaki y Malczewski, 2008; Ligmann-Zielinska *et al.*, 2008).

Por otra parte, como herramientas informáticas que dan apoyo en la toma de decisiones espaciales, existen varios Sistemas de Información Geográfica (SIG) que disponen de módulos específicos para llevar a cabo este tipo de procesos de planificación. En este sentido, cabe destacar a los SIG *IDRISI*, *ArcGIS* o *ILWIS* (Eastman *et al.*, 1995; Jiang y Eastman, 2000; Malczewski *et al.*, 2003; Marinoni, 2004; Eastman, 2006; Boroushaki y Malczewski, 2008; López Vázquez y otros, 2008).

Con respecto al área de estudio que vamos a abordar, la Comunidad de Madrid, podemos decir que en los últimos 15-20 años se ha convertido en una región de un dinamismo territorial considerable, debido, principalmente, al crecimiento de las superficies artificiales de forma dispersa sobre todo su territorio. Este crecimiento no ha venido de la mano de una planificación con unos criterios mínimos de sostenibilidad, por lo que hoy día podemos constatar importantes impactos territoriales y paisajísticos en toda la región. A modo de ejemplo, podemos decir que tan sólo en la última década del siglo pasado fueron urbanizadas aproximadamente 50.000 hectáreas, en detrimento principalmente de usos agrícolas y forestales (Plata Rocha y otros, 2009). Por esto resulta de especial importancia explorar en el desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimos o deseables que, basándonos en la valoración del crecimiento urbano real ocurrido en los últimos años, nos permita llevar a cabo una asignación futura con criterios de crecimiento óptimo.

Así, **el objetivo** principal de este trabajo es realizar un ensayo metodológico para la simulación de un modelo de crecimiento urbano óptimo que nos permita localizar nuevos usos residenciales, comerciales e industriales en aquellas partes del territorio con vocación y aptitud para este tipo de actividad, fundamentado, como pilares básicos del desarrollo urbano sostenible, en la utilización de factores sociales, económicos y ambientales. Esto nos permitirá hacer un análisis y reflexión sobre el modelo de desarrollo urbano actual y futuro de la Comunidad de Madrid. Para ello, en primer lugar, se elaborará un modelo óptimo para el año 2000, partiendo de los datos de ocupación del suelo de 1990. Con estos resultados se realizará una comparación y evaluación entre el modelo de crecimiento urbano óptimo y el ocurrido en la realidad para el año 2000. Posteriormente se plantearán

dos modelos de simulación para el año 2020, uno partiendo de la ocupación real en el año 2000, y otro partiendo de las zonas óptimas obtenidas para ese mismo año. Esto nos permitirá tener una referencia a largo plazo de cómo hubiese sido el crecimiento urbano deseable desde 1990 al 2020, y poder compararlo con el escenario más realista que parte de lo real del año 2000 a lo deseable en 2020.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La región de Madrid se considera uno de los focos críticos de la Unión Europea en lo que a desarrollo urbano se refiere, experimentando en los últimos 10-15 años un proceso de rápida urbanización (Figura 1), donde han predominado las urbanizaciones residenciales con patrones difusos adyacentes o desconectados de los centros urbanos existentes (EEA, 2006; Santiago Rodríguez, 2007; García Palomares y Gutiérrez Puebla, 2007).

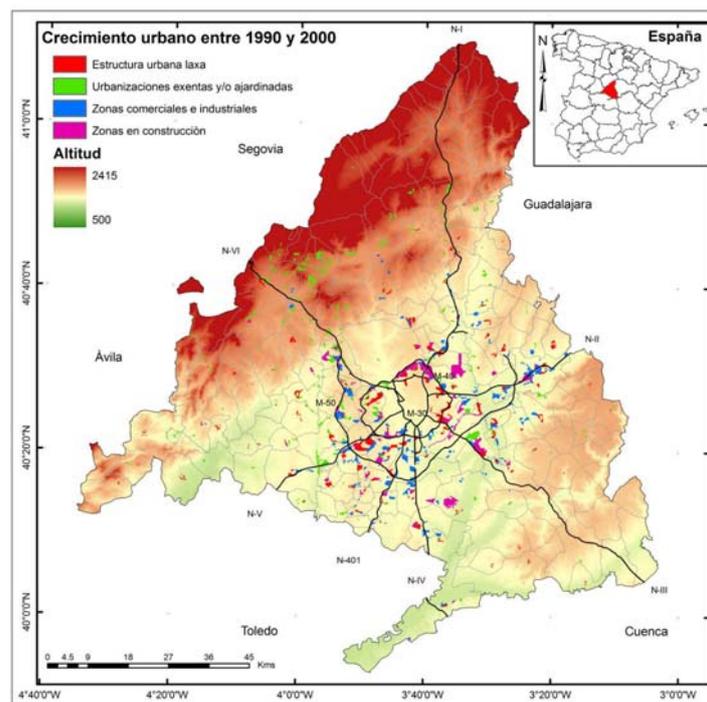


Figura 1. Área de estudio. Comunidad Autónoma de Madrid, España.

Fuente. Elaboración propia a partir del CLC1990 y 2000. Instituto Geográfico Nacional, España

Dentro de esta dinámica, se puede señalar el hecho de que aproximadamente 50.000 has se han convertido en superficies artificiales entre 1990 y 2000, es decir, cerca de un 50 % de las existentes en 1990 (Aldana, 2005; OSE, 2006; Plata Rocha y otros, 2009). También hay que destacar que el crecimiento de la población no justifica esta dinámica, pues en ese mismo período sólo aumentó en un 5,16%.

Uno de los factores determinantes en este proceso es la demanda de primeras y segundas residencias (López de Lucio, 2003). Esta demanda se consolidó gracias a la situación económica favorable vivida en este periodo en España. No obstante, el precio de la vivienda ha ido en progresivo aumento, lo que ha provocado que la población busque alternativas de vivienda más asequibles y se instale cada vez más lejos de los centros urbanos más consolidados, donde el suelo es más caro, y de los centros de trabajo, lo que ha supuesto incrementar notablemente la dependencia del coche para la movilidad diaria (EEA, 2006).

Lo anterior se ha visto favorecido aun más con la mejora en la red de transporte (autopistas, carreteras de circunvalación, y ampliaciones y mejoras de la red ferroviaria) que ha fomentado un proceso de descentralización de los sectores productivos y residenciales (López de Lucio, 2003 y 2004; EEA, 2006), ocasionando una progresiva presión urbanística y la pérdida de importantes cantidades de suelo dedicado a la agricultura, entre ellos los de mejor calidad (Oñate Cid, 2002; Encinas Escribano y otros, 2005).

Como resultado de esta dinámica, la región urbana de Madrid se transforma a una velocidad notable, configurándose un nuevo modelo territorial aquejado de serios problemas de sostenibilidad, dentro del contexto de un marco débil de planeamiento espacial, común en una gran cantidad de regiones urbanas europeas, en las cuales la capacidad reguladora de los municipios no puede igualar las enormes fuerzas que conforman el nuevo territorio (López de Lucio, 2003). No obstante, esto debe ser corregido mediante políticas públicas que re-equilibren y re-direccionen las dinámicas puestas en marcha (Leboreiro, 1999; López de Lucio, 2003).

3. DATOS Y METODOLOGÍA

Las categorías de superficies artificiales seleccionadas para realizar esta asignación óptima del crecimiento urbano de la región fueron las que experimentaron un mayor crecimiento en los últimos 15-20 años, a saber, las superficies residenciales, industriales y comerciales.

Es necesario señalar que las zonas residenciales que se van a asignar son superficies destinadas a áreas residenciales continuas y discontinuas, mientras que las zonas comerciales se refieren, principalmente, a aquellas dedicadas a grandes áreas comerciales y

de esparcimiento, como hipermercados y grandes centros comerciales. Por su parte, las zonas industriales se corresponden con la asignación de polígonos industriales, sin incluir instalaciones de carácter especialmente contaminantes, que requerirían un tratamiento y asignación especial.

Para desarrollar los modelos se recopilamos un conjunto de variables espaciales, tomando como referencia la literatura existente sobre este tipo de estudios, pero, sobre todo, teniendo en cuenta la disponibilidad de información para nuestra área de estudio. Finalmente se recopilamos datos referentes a usos del suelo (*Corine Land Cover* 1990 y 2000), tipos de suelo, hidrografía, carreteras (1991 y 1998), espacios naturales protegidos (*Red Natura* 2000), vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos, geotecnia, instalaciones no deseables, equipamientos, altitud, pendiente y orientación del terreno, población y delimitaciones administrativas. Dicha información se extrajo de diferentes fuentes, tales como: Instituto Geográfico Nacional, Instituto Geológico y Minero, Consejería de Agricultura y Servicio de Cartografía Regional de la Comunidad de Madrid, Departamento de Estadística de la Consejería de Economía de la Comunidad de Madrid, Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares, entre otras. La escala original de la información es en general 1:100.000, aunque en algunos casos se tuvo que recurrir a datos de escala mayor o menor. Toda la información fue tratada en formato raster en el SIG Idrisi Andes, utilizando un tamaño de píxel de 50m.

En cuanto a la metodología seguida, como se comentó anteriormente una de las técnicas de EMC más ampliamente utilizadas en distintas investigaciones es la sumatoria lineal ponderada. Asimismo, el método de jerarquías analíticas ha sido también ampliamente probado en modelos que tienen una estructura jerárquica, y en los cuales se pondera la importancia relativa de los elementos en cada nivel de la jerarquía, descendiendo del más general al más concreto. Para ponderar las alternativas y factores en los modelos existen diferentes métodos (escala de 7 puntos, tasación simple, ordenación simple, etc.), no obstante uno de los más aceptados y utilizados es el método de comparación por pares de Saaty. En este trabajo se utilizan dichos métodos para valorar, ponderar y agregar los factores, así como para obtener los mapas de aptitud.

Con respecto a la normalización de los factores, se aplicaron operadores borrosos, en su mayoría funciones lineales y sigmoidales. No obstante, en algunos casos particulares se

aplicaron metodologías específicas, como es el caso de los factores de accesibilidad a núcleos urbanos, uso del suelo y población ponderada por la distancia.

Una vez obtenidos los factores normalizados y sus pesos finales se aplicó, como se comentó anteriormente, la sumatoria lineal ponderada para obtener los mapas de aptitud para los usos de suelo residencial, comercial e industrial, basados en la siguiente ecuación:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot v_{ij}$$

Donde: r_i es el nivel de aptitud del píxel i ; w_j es el peso del factor j ; y v_{ij} es el valor normalizado (0-255) del píxel i en el factor j .

Posteriormente, se utilizó la metodología diseñada por Franco y Bosque (1997) para convertir los mapas de aptitud en mapas de parcelas de adecuación con un tamaño predefinido. Este procedimiento permite paliar los problemas de dispersión, fragmentación y obtención de parcelas demasiado pequeñas que se presentan cuando se trabaja con mapas de aptitud a nivel de píxel.

Con los mapas de parcelas para los tres objetivos (residencial, comercial e industrial), y utilizando una técnica de asignación multiobjetivo (MOLA, *MultiObjective Land Allocation*), se generó finalmente el mapa de asignación óptima para las zonas residenciales, comerciales e industriales.

Dicha metodología ha sido implementada en una herramienta específica denominada *BuildScenary*, diseñada y desarrollada en el marco del proyecto de investigación SIMURBAN, especialmente para la asignación de usos del suelo. En ella se integra la sumatoria lineal ponderada como técnica de agregación de los factores y elaboración de los mapas de aptitud para cada objetivo (uso de suelo), un método de generación de mapas en parcelas de adecuación media y finalmente una asignación multiobjetivo de dichos mapas (Rodríguez Álvarez y otros, 2009). Este módulo se encuentra disponible en http://www.geogra.uah.es/web_simurban/index.php.

En el Apéndice 1 se presenta un esquema de la metodología seguida en el estudio. A continuación presentamos la metodología específica para el desarrollo del modelo de

asignación óptima para el año 2000. En el apartado 3.2 se describirán las características del modelo desarrollado para el año 2020, con las dos variantes propuestas.

3.1. Modelización de la asignación óptima de suelo urbano para el año 2000, partiendo de los datos de 1990

Con los factores finalmente disponibles se trató de cubrir aspectos como la accesibilidad a servicios, comercios y otros elementos importantes para el desarrollo funcional de la ciudad, tales como la accesibilidad a: zonas urbanas, carreteras e industrias. También se incluyen factores con el fin de proteger el medio ambiente, los espacios naturales y sobre todo que dicha asignación no suponga una inversión económica muy elevada.

A continuación se precisarán uno a uno los 15 factores y otras tantas restricciones utilizados y el tratamiento que se le dio para su posterior inclusión en el modelo de crecimiento urbano óptimo basado en técnicas de evaluación multicriterio.

3.1.1. Criterios (factores y restricciones) utilizados y su tratamiento

En primer lugar se elaboró un mapa de **restricciones** partiendo de la planificación legal existente para el año 1996, concretamente las zonas clasificadas como suelo no urbanizable de protección. Cabe señalar que dentro de este mapa se consideran casi en su totalidad a los espacios naturales protegidos. También se consideraron como restricciones las superficies artificiales existentes en 1990, cuerpos de agua y la red hidrográfica (Figura 2).

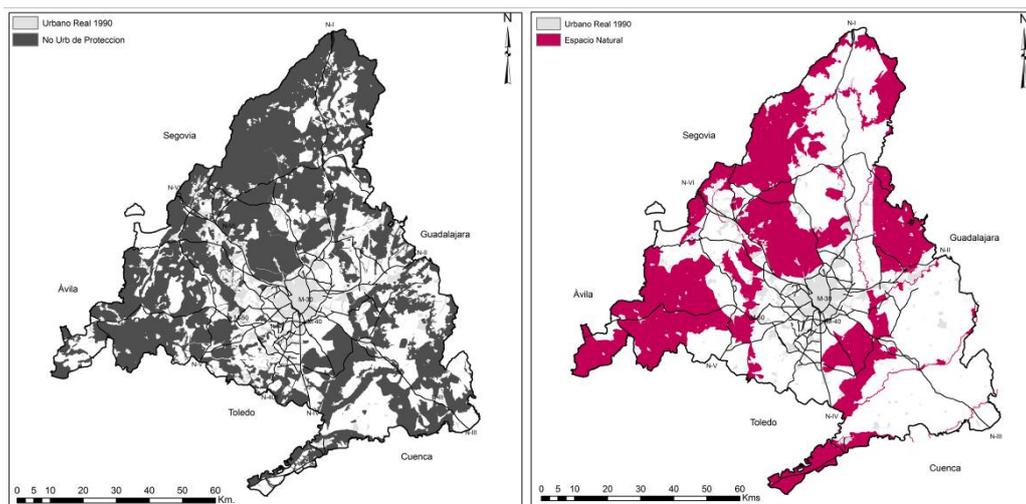


Figura 2. Restricciones utilizadas en el modelo (a la izquierda mapa de superficies no urbanizables de protección y a la derecha mapa de espacios naturales protegidos).

Fuente. Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio. Servicio de Información Ambiental de la Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo General.

Por otro lado, las variables finalmente recopiladas, y con las que se pretendía minimizar el impacto sobre el medio ambiente y maximizar el desarrollo económico y social, fueron agrupadas en factores ambientales, económicos y sociales.

3.1.1.1. Factores ambientales

Usos del Suelo. Actualmente en la región de Madrid la producción agraria se encuentra en declive debido a la baja productividad de las cosechas, a las inadecuadas infraestructuras y a la alta presión ejercida sobre las áreas periurbanas, donde en un pasado se desarrollaba una cierta actividad agrícola (Martínez Falero, 2002). Esto se contrapone al hecho de que la agricultura sigue siendo una actividad esencial para mantener el tejido social y el equilibrio territorial (MAPYA, 2004), lo cual viene a confirmar el papel esencial e ineludible que tiene la agricultura en la planificación territorial sostenible.

La ausencia de regulaciones específicas en la planificación territorial predice a corto plazo que la agricultura madrileña podría quedar restringida a las zonas de menor potencialidad, encontrándose, de esta manera condenada a desaparecer o a ser una actividad absolutamente marginal dentro de los sectores productivos. Por ello, consideramos necesario incluir en el modelo un factor que considerara, además de la protección de las zonas agrícolas, a los pastizales, y a otros usos del suelo con un valor ambiental y económico.

Para tomar en cuenta las consideraciones anteriores, nos basamos en el hecho de que la productividad agrícola y ganadera no se produce de manera homogénea en la Comunidad de Madrid. Por tal motivo, se ha hecho una zonificación del área de estudio clasificando las zonas de mayor productividad agraria (usos agrícolas y pastizales naturales) y las de mayor valor ambiental (bosques), utilizando para ello los datos del censo agrario a nivel de unidades territoriales (NUTS) (Tabla 1 y Figura 3).

Tabla 1. Zonas obtenidas a partir de la NUTS

| Zona | NUTs | Agricultura | Pastizales |
|------|---------------------|-------------|------------|
| | | Productivo | |
| 1 | Sierra Sur | Si | Si |
| 2 | Sudeste Comunidad | Si | No |
| | Sudoeste Comunidad | Si | No |
| | Sur Metropolitano | Si | No |
| 3 | Este Metropolitano | Si | No |
| | Sierra Norte | No | Si |
| | Norte Metropolitano | No | Si |
| 4 | Sierra Central | No | Si |
| | Oeste Metropolitano | No | No |
| | Municipio de Madrid | No | No |
| | Nordeste Comunidad | No | No |



Figura 3. Zonas obtenidas a partir de la NUTS

Posteriormente, tomando en cuenta dicha zonificación y las categorías del mapa de uso del suelo *Corine Land Cover 1990 (CLC1990)* al nivel 3, se dio un peso mayor a aquellos usos de mayor productividad o con valor ambiental, y menor peso a los usos que podrían ser más aptos para el asentamiento de nuevas urbanizaciones (Tabla 2). Después, se reclasificaron los usos del suelo asignándole su correspondiente valor de aptitud, para posteriormente normalizar dicho mapa por medio de una función borrosa de tipo lineal con decremento monótono y obtener así el factor de usos de suelo.

Tabla 2. Valores de aptitud asignados a los usos del suelo (mínimo=0 y máximo=1)

| Tipos | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 |
|--|--------|--------|--------|--------|
| 1. Cultivos permanentes | 0,18 | 0,25 | 0,13 | 0,20 |
| 2. Terrenos regados permanentemente | 0,18 | 0,25 | 0,13 | 0,20 |
| 3. Zonas Agrícolas Heterogéneas | 0,14 | 0,20 | 0,19 | 0,18 |
| 4. Bosques | 0,14 | 0,15 | 0,14 | 0,20 |
| 5. Pastizales naturales | 0,18 | 0,05 | 0,23 | 0,12 |
| 6. Tierras de labor en seco | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| 7. Praderas | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| 8. Espacios de vegetación arbustiva y herbácea | 0,11 | 0,03 | 0,11 | 0,03 |

Protección de suelo de mayor productividad. Con este factor se intenta que las nuevas zonas urbanas se desarrollen, hasta donde sea posible, en suelos de peor calidad y menos desarrollados. Para ello, partiendo del mapa de suelos, se dieron valores de menor aptitud a los luvisoles y fluvisoles, considerando que estos suelos son los que cuentan con las mejores propiedades, por ejemplo, para el desarrollo de la actividad agrícola. Este factor en alguna medida viene a complementar al factor anterior, ya que no toda la superficie de los suelos aptos para la agricultura está actualmente explotada.

Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos. Para la asignación de las superficies artificiales es necesario implementar medidas que disminuyan la contaminación que sobre los mantos acuíferos pueden producir los vertidos contaminantes de las ciudades. Esto se puede hacer si se considera que las zonas urbanas deben desarrollarse en formaciones con la menor permeabilidad, en terrenos metamórficos y graníticos. Considerando lo anterior, se diseñó un factor para las zonas urbanas y comerciales, y otro para las zonas industriales, bajo la lógica de que las zonas industriales pueden contaminar más que las zonas residenciales y comerciales.

Lejanía a espacios naturales y a la red hidrográfica. Con estos factores se intenta que las nuevas superficies artificiales se localicen lejos de estos elementos. Así, la adecuación para el desarrollo de nuevos usos urbanos aumentaría a medida que nos alejemos de los espacios naturales existentes y de la red hidrográfica.

3.1.1.2. Factores económicos

Pendiente. La adecuación fue considerada inversamente proporcional al valor de la pendiente en cada píxel, fijándose adecuación nula a partir del 10 % de pendiente del terreno. Con esto se intenta garantizar que las nuevas zonas urbanas se asignen en sitios topográficamente llanos, con la finalidad de minimizar el coste de construcción y de introducción de los servicios básicos.

Proximidad a zonas urbanas. Comúnmente, en los trabajos revisados la influencia de este factor se considera en función de la distancia a las zonas urbanas (menor distancia mayor aptitud). No obstante, en nuestro trabajo se pretende considerar la sostenibilidad del territorio y para ello nos basamos en las recomendaciones hechas en la Estrategia Territorial Europea, donde se especifica que se debe dar prioridad al crecimiento de ciudades medias e intermedias y limitar el crecimiento de ciudades grandes, así como mantener la ruralización de las localidades pequeñas (Comisión Europea, 1999).

Para diseñar este factor fue necesario hacer una clasificación de los núcleos urbanos en función del número de habitantes, tomando esto como medida de la dimensión de las ciudades (Tabla 3). Con dicha clasificación se obtuvieron 5 mapas de núcleos urbanos, con los cuales se procedió a obtener 5 mapas de proximidad y su posterior normalización entre 0 y 255. A partir de dichos mapas y aplicando el método de comparación por pares de

Saaty se calcularon los pesos para cada mapa (Tabla 3). Por último, con los mapas normalizados y sus pesos, se aplicó una sumatoria lineal ponderada para obtener el mapa final de accesibilidad a las zonas urbanas para la Comunidad de Madrid.

Tabla 3. Ponderación de los núcleos urbanos en función de su población

| Mapa | Núcleos urbanos | Población 1991 | Pesos |
|------|---|-------------------|-------|
| 1 | Pozuelo de Alarcón, Aranjuez, Las Rozas de Madrid, Majadahonda, Arganda del Rey, San Fernando de Henares, Valdemoro, Pinto, Mejorada del Campo, Ciempozuelos. | 10.000 – 50.000 | 0,48 |
| 2 | Torrejón de Ardoz, Alcobendas, Coslada, Parla, San Sebastián de los Reyes. | 50.000 – 100.000 | 0,30 |
| 3 | Móstoles, Leganés, Alcalá de Henares, Fuenlabrada, Alcorcón, Getafe. | 100.000 – 200.000 | 0,13 |
| 4 | Resto de los núcleos urbanos | < 10.000 | 0,06 |
| 5 | Madrid | > 200.000 | 0,03 |

Proximidad a zonas industriales y comerciales. En primer lugar es necesario señalar que para este caso se modelan en conjunto las zonas comerciales e industriales, debido a que dichas categorías están agrupadas en una sola en el CLC 1990. No obstante, se han diseñado dos factores: uno para el modelo de asignación de zonas urbanas e industriales, que se obtuvo directamente a partir de la distancia euclidiana a dicha categoría; y otro para el modelo de asignación de zonas comerciales, el cual se diseña pensando en no aglutinar las nuevas zonas comerciales en las cercanías de las ya existentes. Para ello se dio la mayor adecuación a los píxeles que están entre 2.000 y 10.000 metros de distancia de las zonas comerciales existentes en 1990, aplicando una función de pertenencia borrosa sigmoïdal y simétrica.

Accesibilidad a carreteras. Con la finalidad de que las zonas resultantes de la aplicación de estos modelos presenten una buena accesibilidad, así como patrones de crecimiento compactos, se incluye este factor derivado de la distancia a las carreteras principales de la Comunidad de Madrid (menor distancia mayor adecuación).

Geotecnia. La asignación de las zonas residenciales, comerciales e industriales se debe hacer evitando que éstas se encuentren en zonas donde exista riesgo de fallas activas, riesgo sísmico o sitios de baja estabilidad geomorfológica. Para el diseño de este factor se aprovechó la información que aportaba el mapa de Geotecnia de la Comunidad de Madrid

sobre problemas de compactación, cimentación y fisuración de las rocas, poniendo especial atención en todas aquellas zonas que tuviesen alguno de los siguientes problemas o una combinación de varios de ellos: riesgo de deslizamiento, oquedades subterráneas y nivel freático a escasa profundidad.

Por otro lado, cabe señalar que algunos de los factores clasificados en el criterio ambiental pudieran ser clasificados en este criterio o viceversa, tal es el caso de los factores usos del suelo, protección de suelo de mayor productividad y geotecnia. No obstante, con la finalidad de compensar la distribución de los factores en cada criterio y su influencia en el modelo se optó por clasificar a los factores como se mostró anteriormente.

3.1.1.3. Factores sociales

Lejanía a instalaciones no deseables, proximidad a hospitales y universidades. Con la inclusión del primer factor se intenta minimizar el riesgo o molestias que ocasionan las instalaciones no deseables a la población, es decir este factor tendrá el efecto de alejar a la población de dichas instalaciones. Los otros dos factores se basan en uno de los criterios de sostenibilidad, en particular el acceso de la población a los servicios básicos, minimizando la distancia a centros sanitarios (hospitales) y educativos (universidades).

Cuencas Visuales. Un aspecto a tomar en cuenta en la asignación de nuevas urbanizaciones es la calidad visual del paisaje. Para ello, se consideraron como elementos de especial interés a los espacios naturales protegidos, a los humedales y a las zonas de bosque, y se establecieron hasta tres zonas de visibilidad (y de preferencia, por tanto) en función de la distancia a estos elementos: la primera menor a 700 metros (peso = 0,57); una segunda entre 700 y 1.500 metros (peso = 0,29); y la última entre 1.500 y 5.000 metros (peso = 0,14).

Convendría matizar que éste sería un factor de relevancia social, pero no tiene por qué serlo desde el punto de vista ambiental. Por ese motivo, en el grupo de los factores ambientales se ha intentado alejar las nuevas zonas residenciales de los espacios naturales protegidos, compensando así lo deseable desde el punto de vista ambiental y lo deseable desde el punto de vista social.

Orientación del terreno. En los procesos de construcción de edificaciones se considera que la orientación Sureste en estas latitudes son las más confortables para ubicar una zona

residencial. En este caso, el factor da las mayores adecuaciones a las orientaciones entre 90 y 180 grados, obteniéndose con una función de tipo *sigmoïdal* y simétrica.

Distancia (ponderada) a la población. Uno de los aspectos considerados en este modelo es la localización de la población, tomando en cuenta dos criterios: alejar a la población más vulnerable de las nuevas zonas industriales y acercar los nuevos establecimientos comerciales a la población con mayor poder adquisitivo. Ante estos dos casos se clasificó a la población vulnerable (población < 16 años y > 64 años) y a la población con mayor poder adquisitivo (población entre 25 y 64 años) (Bosque Sendra y otros, 1999 y Gómez Delgado, 2003).

Finalmente, obtenidos todos los factores se llevó a cabo un análisis de correlación para determinar aquellos factores que pudiesen estar midiendo el mismo fenómeno. De los resultados obtenidos de dicho análisis se pudo comprobar que solamente el factor de proximidad a zonas industriales y comerciales mantiene un grado de correlación alto con la distancia a instalaciones no deseables (0,79). No obstante, dichos factores, hasta cierto punto, influyen de manera inversa en los modelos. De cualquier forma y para evitar sobreestimaciones, se le otorgó mayor importancia a un factor y menor a otro. Asimismo, el factor de proximidad a hospitales se correlacionó con el factor de accesibilidad a universidades (0,73), tomándose la decisión de eliminar este último.

3.1.2. Ponderación de los factores

Para la ponderación de los factores se persiguió que el modelo cumpliera, en la medida de lo posible, las condiciones de un modelo de crecimiento urbano óptimo, tratando de manera conjunta el interés que pudieran tener los diferentes grupos implicados en el desarrollo de las actividades urbanas, comerciales e industriales, tales como ambientalistas, empresarios, constructores, sociedad, entes planificadores, entre otros. También se tuvo en cuenta la información derivada de la amplia revisión bibliográfica realizada sobre estos temas y, sobre todo, el consenso de los expertos del proyecto SIMURBAN (compuesto por geógrafos, ingenieros, ambientalistas, etc.).

De este modo para las zonas residenciales y comerciales se ponderó en primer lugar el criterio económico seguido del ambiental y en último el social, mientras que para las zonas

industriales se intentó proteger el medio ambiente dando un mayor peso al criterio ambiental, seguido del criterio económico y por último el social.

Asimismo, en la asignación de los pesos de cada factor se consideró de mayor importancia la protección de los usos del suelo, los espacios naturales, la hidrografía, la accesibilidad a zonas urbanas, carreteras y zonas industriales y comerciales, así como la seguridad de los habitantes ante algún riesgo derivado de las industrias o instalaciones no deseables y la accesibilidad a los servicios. Finalmente y siguiendo con el procedimiento de jerarquías analíticas, se obtuvo el peso final de cada factor, multiplicando el peso otorgado a cada uno de ellos, nivel por nivel. (Tabla 4).

Tabla 4. Jerarquía final para el análisis de asignación óptima de zonas urbanas en la Comunidad de Madrid.

| Factores | Subfactores | Peso | Peso | Peso | Peso Final | Peso Final | Peso Final |
|---|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Residencial | Comercial | Industrial | Residencial | Comercial | Industrial |
| Ambiental U = 0,34 C = 0,31 I = 0,54 | 1. Usos del suelo (CLC1990) | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,14 | 0,12 | 0,21 |
| | 2. Lejanía a hidrografía | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,07 | 0,06 | 0,10 |
| | 3. Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,03 | 0,02 | 0,04 |
| | 4. Lejanía a espacios naturales | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,05 | 0,04 | 0,08 |
| | 5. Protección de suelos de mayor productividad | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,07 | 0,06 | 0,10 |
| Suma=1 | Suma = | 1,00 | 1,00 | 1,00 | | | |
| Económico U = 0,46 C = 0,49 I = 0,30 | 1. Pendiente | 0,05 | 0,05 | 0,08 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| | 2. Accesibilidad a carreteras | 0,26 | 0,35 | 0,36 | 0,12 | 0,17 | 0,11 |
| | 3. Accesibilidad a zonas urbana | 0,36 | 0,29 | 0,26 | 0,16 | 0,14 | 0,08 |
| | 4. Access. a industrias y comercios | 0,19 | 0,22 | 0,15 | 0,09 | 0,11 | 0,05 |
| | 5. Geotecnia | 0,14 | 0,10 | 0,15 | 0,06 | 0,05 | 0,05 |
| Suma=1 | Suma = | 1,00 | 1,00 | 1,00 | | | |
| Social U = 0,20 C = 0,20 I = 0,16 | 1. Lejanía a instalaciones no deseables | 0,11 | 0,28 | 0,31 | 0,02 | 0,06 | 0,05 |
| | 2. Accesibilidad a hospitales | 0,52 | 0,25 | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,03 |
| | 3. Distancia (ponderada) población | | 0,33 | 0,49 | | 0,07 | 0,08 |
| | 4. Cuencas Visuales | 0,07 | 0,08 | | 0,02 | 0,02 | |
| | 5. Orientación del terreno | 0,29 | 0,06 | | 0,05 | 0,01 | |
| Suma=1 | Suma = | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

3.2. Modelización de la asignación óptima de suelo urbano para el año 2020, partiendo de los datos reales de 2000 y los datos resultantes del modelo de asignación óptima para el año 2000.

Existen dos posibilidades de obtener la asignación óptima para el año 2020 en función de la información disponible hasta el momento. En primer lugar, partiendo de la configuración territorial real existente en el año 2000 y, por otro lado, utilizando como base los resultados del modelo óptimo obtenidos para el año 2000, partiendo de la situación real de 1990 (Apéndice 1). En este caso se simularán ambas, con la finalidad de

poder establecer una comparación entre como se hubiesen desarrollado los patrones de crecimiento urbano deseables para el año 2020, dándole continuidad desde 1990, y qué patrones se pudiesen dar partiendo de la realidad del año 2000.

3.2.1. Factores a incluir en los modelos

Para el primer caso, los factores y su ponderación serán los mismos que se utilizaron en el modelo anterior actualizados al año 2000. En el segundo caso no será posible incluir el factor de distancia ponderada a la población debido a que se utilizarán las zonas residenciales óptimas obtenidas, a las que no es posible asignarles un dato de población conocido. Asimismo, será necesario hacer algunas adaptaciones en factores como accesibilidad a zonas urbanas y usos del suelo, así como actualizar al año 2000 alguno de los factores de accesibilidad.

Con respecto al factor de accesibilidad a los núcleos urbanos, se consideran como zonas urbanas de partida las existentes en 1990, más las zonas óptimas obtenidas en el modelo proyectado para el año 2000. Con esta base se genera el factor de accesibilidad a zonas urbanas igual que en el modelo 1990-2000, ponderando en primer lugar las zonas óptimas y los núcleos urbanos de tamaño medio e intermedio, y en último término los núcleos pequeños y la gran urbe de la región (Tabla 5).

Tabla 5. Ponderación de los núcleos urbanos en función de su población.

| Mapa | Núcleos urbanos | Población 1991 | Pesos |
|------|---|-------------------|-------|
| 0 | Zonas óptimas obtenidas para el año 2000 | | 0,30 |
| 1 | Pozuelo de Alarcón, Aranjuez, Las Rozas de Madrid, Majadahonda, Arganda del Rey, San Fernando de Henares, Valdemoro , Mejorada del Campo, Ciempozuelos, Pinto. | 10.000 – 50.000 | 0,30 |
| 2 | Torrejón de Ardoz, Alcobendas, Coslada, Parla, San Sebastián de los Reyes. | 50.000 – 100.000 | 0,20 |
| 3 | Móstoles, Leganés, Alcalá de Henares, Fuenlabrada, Alcorcón, Getafe. | 100.000 – 200.000 | 0,12 |
| 4 | Resto de los núcleos urbanos | < 10.000 | 0,05 |
| 5 | Madrid | > 200.000 | 0,03 |

Por su parte, el factor usos del suelo se generó a partir del CLC 2000, al que se le realizaron dos modificaciones. En primer lugar, a dicho mapa se le asignaron los usos del suelo de 1990 en el lugar donde se dieron las superficies artificiales entre 1990 y 2000, y

en segundo lugar se asignaron los usos residenciales, comerciales e industriales óptimos obtenidos en el modelo de 1990 al 2000. Con este mapa se procedió a elaborar el factor de usos del suelo, aplicando la misma metodología que en el modelo 1990-2000.

Por último, como restricciones en ambos modelos se utilizaron el mapa de superficies no urbanizables de protección disponible para el año 2003 de la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio, así como las superficies artificiales, hidrografía, humedales y embalses existentes en el año 2000.

Una vez obtenidos los factores para ambos modelos se otorgan los pesos de forma equivalente a los asignados en el modelo 1990-2000 (Tabla 6).

Tabla 6. Pesos asignados a los modelos: 1) el que utiliza a los usos urbanos óptimos del 2000, y 2) el que parte de los usos urbanos reales del año 2000.

| Factores | 1). Pesos modelo óptimo usos urbanos óptimos del año 2000 | | | 2). Pesos modelo óptimo usos urbanos reales del año 2000 | | |
|--|---|-------------|-------------|--|-------------|-------------|
| | Residencial | Comercial | Industrial | Residencial | Comercial | Industrial |
| 1. Usos del suelo (CLC1990) | 0,14 | 0,15 | 0,21 | 0,14 | 0,12 | 0,21 |
| 2. Lejanía a hidrografía | 0,07 | 0,06 | 0,10 | 0,07 | 0,06 | 0,10 |
| 3. Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,04 |
| 4. Lejanía a espacios naturales | 0,05 | 0,04 | 0,08 | 0,05 | 0,04 | 0,08 |
| 5. Protección de suelos de mayor productividad | 0,07 | 0,06 | 0,10 | 0,07 | 0,06 | 0,10 |
| 1. Pendiente | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| 2. Accesibilidad a carreteras | 0,12 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,17 | 0,11 |
| 3. Accesibilidad a zonas urbana | 0,16 | 0,25 | 0,08 | 0,16 | 0,14 | 0,08 |
| 4. Accesibilidad a comercios | 0,09 | 0,11 | --- | 0,09 | 0,11 | --- |
| 5. Accesibilidad a industrias | --- | --- | 0,05 | --- | --- | 0,05 |
| 6. Geotecnia | 0,06 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,05 | 0,05 |
| 1. Lejanía a instalaciones no deseables | 0,02 | 0,06 | 0,10 | 0,02 | 0,06 | 0,05 |
| 2. Accesibilidad a hospitales | 0,10 | 0,05 | 0,06 | 0,10 | 0,05 | 0,03 |
| 3. Distancia (ponderada) población | --- | --- | --- | --- | 0,07 | 0,08 |
| 4. Cuencas Visuales | 0,02 | 0,02 | --- | 0,02 | 0,02 | --- |
| 5. Orientación del terreno | 0,05 | 0,01 | --- | 0,05 | 0,01 | --- |
| Suma = | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

No obstante, y como se comentó anteriormente, en el modelo que usa las zonas urbanas óptimas no se incluirá al factor de distancia ponderada a la población. Para compensar esta exclusión, en el modelo de asignación de zonas comerciales se aumentó el peso del factor de accesibilidad a zonas urbanas y de los usos de suelo, con la finalidad de atraer las zonas comerciales cerca de la población que vive en las zonas urbanas y asignarlas en terrenos de

menor valor ambiental y productivo; asimismo se disminuyó el peso del factor de accesibilidad a carreteras debido a que, en ausencia del factor excluido, éste condicionaba la asignación de las zonas comerciales en cualquier margen de una carretera. Por su parte, la exclusión de este factor en el modelo de asignación de zonas industriales propició el aumento de los pesos de los factores de lejanía a instalaciones no deseables y de accesibilidad a hospitales, otorgando así mayor importancia a los factores agrupados en el criterio social.

3.2.2. Estimación de la demanda de suelo para el año 2020

Otro aspecto a considerar en el modelo es la demanda de superficie de crecimiento urbano deseable para el año 2020. Para ello, se siguió el trabajo de Aguilera Benavente y otros (2009), donde se estima la demanda de suelo necesaria en la Comunidad de Madrid para el año 2020 en un escenario de crecimiento urbano sostenible, escenario que mantiene algunas sinergias con el modelo que estamos planteando en este trabajo; además dicha demanda coincide, en cierta medida, con la demanda manejada por Barredo Cano y Gómez Delgado (2008) en el desarrollo de un escenario de crecimiento urbano compacto para la región de Madrid, en el cual la superficie de suelo requerida para el 2020, según los autores, debe decrecer hasta en un 40% con respecto al periodo 1990-2000.

Cabe señalar que en el trabajo de Aguilera Benavente y otros (2009) se genera la demanda para los usos de suelo residencial y productivo, de tal forma que éste trabaja con los usos comerciales e industriales de forma conjunta. Esto en principio resulta un inconveniente a la hora de asignar la superficie requerida para el uso comercial e industrial en nuestro modelo. Sin embargo, los datos aportados por la Dirección General de Urbanismo y Estrategia Territorial de la Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio, muestran que en el año 2004 los usos industriales y de servicios y equipamientos tienen prácticamente la misma superficie (<http://www.madrid.org/iestadis/fijas/estructu/general/anuario/ianuconsc1.htm>). Ante esto, decidimos hacer una distribución en partes iguales de la demanda del suelo productivo entre las zonas comerciales e industriales. Así, la demanda de suelo residencial fue de 17.618 has, de superficies comerciales 5.418 has y de suelo industrial 5.418 has.

4. RESULTADOS DEL MODELO DE ASIGNACIÓN ÓPTIMA PARA EL AÑO 2000. ANÁLISIS COMPARATIVO CON EL CRECIMIENTO REAL EXPERIMENTADO ENTRE EL PERÍODO DE 1990 A 2000

Diseñados los factores y definidos sus pesos se obtuvieron, aplicando la sumatoria lineal ponderada, los mapas de aptitud para cada uso del suelo modelado. Posteriormente, y a partir de éstos, se generaron los mapas con parcelas de adecuación media, con un tamaño mínimo de parcela de 50 has para los tres usos a modelar y un tamaño máximo de 250 y 500 has para las zonas comerciales e industriales y las zonas residenciales, respectivamente. Para determinar este último aspecto se consideró el tamaño medio y máximo de las parcelas de crecimiento real registrado entre 1990 y 2000.

Por último, se llevó a cabo una asignación multiobjetivo, en la cual se requiere definir las metas de superficie para cada uso del suelo. Para ello una vez más la referencia fue el crecimiento real experimentado entre 1990 y 2000. El aumento de las zonas urbanas en este período fue de 17.948,3 has, mientras que las zonas comerciales e industriales aumentaron en 7.874,5 has en conjunto. Como en el CLC de 1990 estas últimas categorías están clasificadas en una sola, por tanto, para asignar las metas de superficies se repartió a la mitad el total de dicho crecimiento (Comercial = 3.937,25 e Industrial = 3.937,25).

Finalmente, se obtuvo el mapa de asignación óptimo al año 2000 para las categorías residencial, comercial e industrial. En las figuras 4 y 5 se presenta una comparación entre el modelo de asignación óptimo para el año 2000 y el crecimiento real, partiendo de la situación real en 1990. De este modo, se puede observar que los resultados arrojados por el modelo (Figura 4) en una primera instancia nos dejan ver patrones de crecimiento más compactos que los ocurridos en la realidad durante el mismo período, el cual presenta una configuración mucho más dispersa en el territorio, cerca de los núcleos con menos de 10.000 habitantes y fundamentalmente en detrimento de los bosques y pastizales naturales (Figura 5). Así, se puede observar como en el modelo de crecimiento urbano óptimo los factores uso del suelo y protección de los suelos más desarrollados ayudó a discriminar las zonas con mayor productividad ganadera, en este caso la sierra de Madrid, y al mismo tiempo proteger, hasta cierto punto, las zonas con alta productividad agrícola (tal es el caso del sureste de Madrid). Por otra parte, las nuevas zonas residenciales son localizadas próximas a los núcleos urbanos de tamaño medio e intermedio (entre 10.000 y 100.000

del corredor del Henares; en la N-III en los municipios de Arganda del Rey y Morata de Tajuña; sobre la N-IV, N-401 y N-V entorno a municipios como Getafe, Pinto, Valdemoro, Ciempozuelos, Leganés, etc. En la N-VI el crecimiento se produce de manera particular entorno a las carreteras de circunvalación madrileñas, como la M-30, M-40 y M-50 (Figura 4).

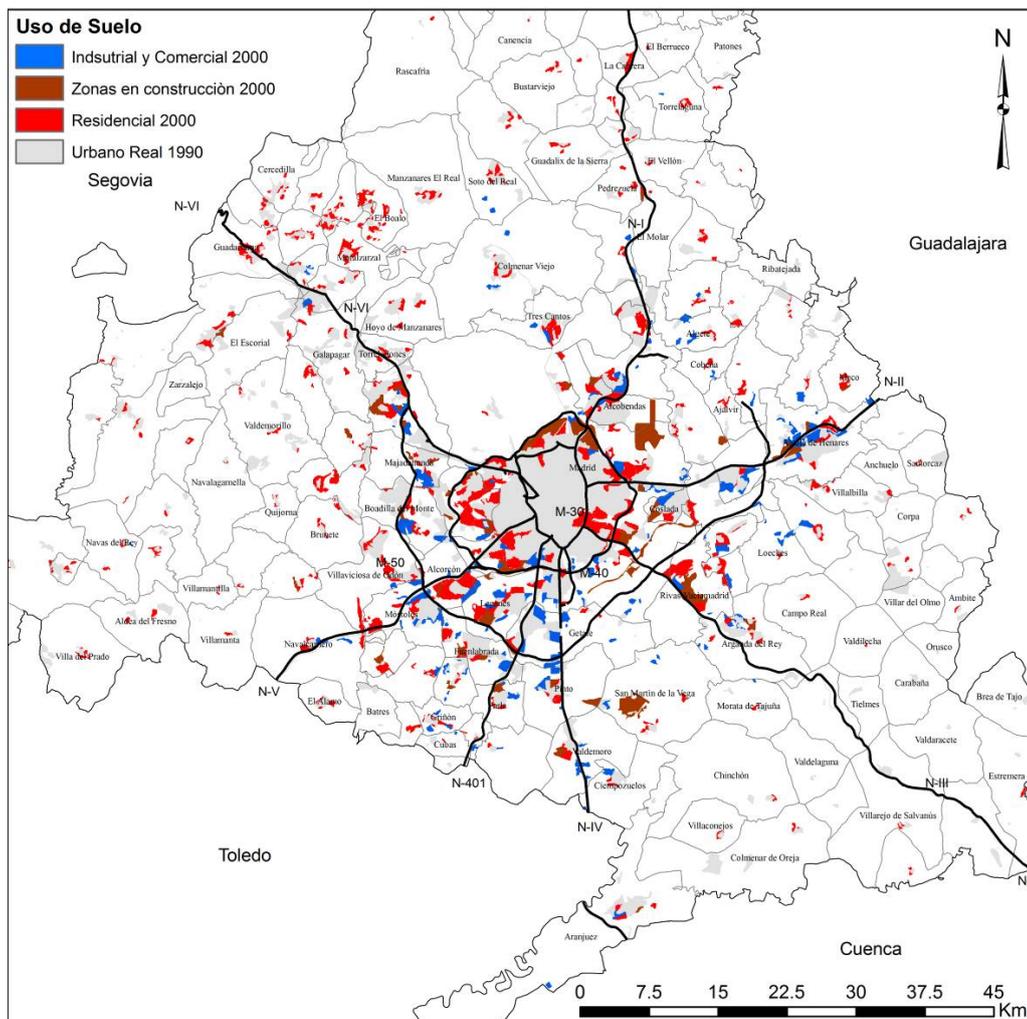


Figura 5. Crecimiento urbano real entre 1990 y 2000 (en la leyenda las zonas comerciales e industriales aparecen unidas, ya que en el CLC 1990 éstas están agrupadas en una sola categoría).

Fuente. Datos del Corine Land Cover 1990 y elaboración propia

Tabla 7. Adecuación media de las parcelas en el modelo de crecimiento óptimo y en el crecimiento real

| Categoría | Óptima | Real |
|-------------|--------|-------|
| Residencial | 176,2 | 100,8 |
| Comercial | 181,1 | 108,6 |
| Industrial | 174,4 | 106,3 |

Por su parte, la asignación de las zonas comerciales se distribuye en diferentes sitios de la Comunidad, ya que su ubicación se proyectó para que se localizaran a distancias considerables entre ellas, con la intención de maximizar el área de captación de usuarios potenciales. Para esto, el factor de accesibilidad a zonas comerciales y el factor de proximidad a los núcleos urbanos ponderados en función del poder adquisitivo de la población fueron de gran importancia.

En cuanto a la asignación de las zonas industriales se observa que, en general, éstas se localizaron lejos de la población. Aquí el factor de distancia ponderada a la población más vulnerable (niños y adultos mayores), el factor de protección a los usos y tipos de suelo, la accesibilidad a carreteras, zonas residenciales jugaron un papel importante en su ubicación.

Por otro lado, es posible hacer un análisis del impacto que tiene los resultados del modelo óptimo sobre los usos del suelo del año 2000, y compararlo con el impacto real experimentado para ese mismo año. Si prestamos atención a la tabla 8 podemos observar que las tres categorías asignadas en el modelo consumen mayoritariamente 6 tipos de usos del suelo.

Tabla 8. Usos del suelo sustituidos por el residencial, comercial e industrial en el escenario de asignación “óptima” para el año 2000 (en Has).

| Categorías del CLC2000 Nivel 3 | Residencial | Comercial | Industrial | Total | % |
|---------------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|------------------|---------------|
| Tejido Urbano Discontinuo | 1.022,25 | 532,75 | 42,50 | 1.597,50 | 6,2 |
| Zonas Industriales y comerciales | 1.501,00 | 315,50 | 105,25 | 1.921,75 | 7,4 |
| Zonas de extracción minera | 229,00 | | | 229,00 | 0,9 |
| Zonas en construcción | 958,75 | 286,25 | | 1.245,00 | 4,8 |
| Tierras de labor en secano | 10.197,25 | 1.334,00 | 2.312,75 | 13.844,00 | 53,6 |
| Praderas | | 88,25 | | 88,25 | 0,3 |
| Terrenos principalmente agrícolas | 121,75 | | | 121,75 | 0,5 |
| Sistemas Agroforestales | 112,50 | | | 112,50 | 0,4 |
| Bosque de frondosas | 151,25 | 75,00 | | 226,25 | 0,9 |
| Pastizales naturales | 1.307,50 | 279,50 | 108,25 | 1.695,25 | 6,6 |
| Vegetación esclerófila | 1.640,75 | 202,25 | 1.218,75 | 3.061,75 | 11,9 |
| Matorral boscoso | 482,00 | 773,25 | 101,25 | 1.356,50 | 5,3 |
| Otros | 224,30 | 50,50 | 48,50 | 323,30 | 1,3 |
| Total | 17.948,30 | 3.886,75 | 3.888,75 | 25.499,50 | 100,00 |

En primer lugar, dicha asignación se dio sobre tierras de labor en secano (53,6%), vegetación esclerófila (11,9%), pastizales naturales (6,6%) y matorral boscoso (5,3%). Asimismo, un 6,2 y un 7,4 % coinciden sobre zonas residenciales y zonas comerciales e industriales, respectivamente. Sin embargo, los cambios reales experimentados impactaron en muchos más usos del suelo, ocasionando una fragmentación del paisaje y un

crecimiento disperso sobre todo el territorio madrileño. De hecho, el crecimiento real se abasteció, principalmente, de tierras de labor en secano (42%) y pastizales naturales (24,6%), seguido muy de lejos por las zonas en construcción (7,8%), vegetación esclerófila (5%) y matorral boscoso de transición (2,9%), y el resto queda distribuido en alrededor de 20 categorías de uso del suelo localizadas sobre todo el territorio de la Comunidad (Plata Rocha y otros, 2009). Por lo tanto, se observa que el ajuste del crecimiento urbano real y el óptimo es mínimo, no superando el 13%.

En resumen, se puede confirmar que el diseño de los factores utilizados aporta un cierto grado de sostenibilidad al modelo de ocupación del territorio. Si bien la superficie proyectada en el modelo se podría considerar excesiva, ya que se utilizó el crecimiento real de la categoría residencial, comercial e industrial en el periodo de 1990 al 2000, nos pareció indispensable para poder hacer una comparación entre el crecimiento real y la asignación óptima.

También en el modelo se observan patrones compactos en los usos del suelo, ampliamente recomendados en los trabajos sobre modelos territoriales y urbanos sostenibles. Este resultado no es fortuito sino resultado de la implementación de la técnica de parcelación por intervalos propuesta por Franco Maass y Bosque Sendra (1997) y automatizada por Rodríguez Álvarez y otros (2009) como una herramienta de asignación óptima de usos del suelo.

5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL DESARROLLO URBANO “ÓPTIMO” PARA EL AÑO 2020

En primer lugar hay que recordar que los resultados obtenidos de todos estos modelos se apoyan en factores enmarcados dentro de un modelo de crecimiento urbano deseable. Sin embargo, y para que la simulación tuviese un sustento en cuanto a políticas de planificación urbana, se incluyó como restricción las superficies no urbanizables de protección del año 2003. De este modo se obtuvieron dos modelos de crecimiento urbano óptimo para el año 2020, donde la asignación se hace maximizando la capacidad de acogida del territorio para recibir zonas residenciales, comerciales e industriales, y además en lugares designados para ello en cada uno de los Planes Generales de Ordenación Urbana de la región.

Un análisis espacial preliminar de los resultados nos indica que los dos modelos de asignación de crecimiento urbano para el año 2020 presentan una compacidad en las nuevas manchas artificiales, característica que, en principio, otorga cierta sostenibilidad al modelo de desarrollo urbano. No obstante, y como era de prever, existen en dichos modelos algunas diferencias en la distribución espacial de los usos del suelo. La primera diferencia visual que se observa corresponde al núcleo urbano de Madrid, donde, el modelo que considera el crecimiento urbano real en el 2000 (Figura 6), presenta una estructura urbana más densa, sobrepasando la ronda de circunvalación M-40 y en dirección de los diferentes corredores que forman las carreteras nacionales, ocasionado principalmente por el crecimiento ocurrido en el periodo de 1990 y 2000.

También se puede observar que en la parte sureste de la Comunidad el modelo desarrollado a partir de los datos “óptimos” del año 2000 (Figura 7) presenta un menor crecimiento urbano tanto al norte como al sur de la N-III, lo cual hace que el patrón sea menos disperso que en el modelo representado en la figura 6.

En particular, el modelo desarrollado a partir de las zonas urbanas óptimas para el año 2000 (Figura 7), presenta un crecimiento de las zonas urbanas en municipios del noroeste de la Comunidad (sobre la N-VI), tales como: Galapagar, Collado de Villaba, Collado Mediano y El Escorial; en municipios del Corredor del Henares (N-II) y en municipios de suroeste, como Móstoles, Parla o Pinto.

El modelo desarrollado a partir del crecimiento real registrado en el año 2000 (Figura 6) presenta mayor crecimiento de las zonas urbanas, principalmente en los municipios del Corredor del Henares, así como en algunos municipios de suroeste como Brunete, Móstoles, Arroyomolinos, Parla, Getafe, etc.

Resumiendo, podemos decir que en ambos modelos las nuevas áreas residenciales son asignadas en las cercanías de los núcleos urbanos de tamaño intermedio (evitando así tanto la ineficacia de la dispersión como la excesiva concentración), cercanos a las carreteras (maximizando su accesibilidad) y en general en usos de suelo de baja productividad (evitando el consumo de suelo de alto valor productivo). Del mismo modo, las zonas comerciales resultan distribuidas en lugares cercanos a las nuevas zonas urbanas y a distancias considerables entre ellas. Por su parte, las nuevas zonas industriales están localizadas en lugares próximos a carreteras y en zonas con menor densidad de población.

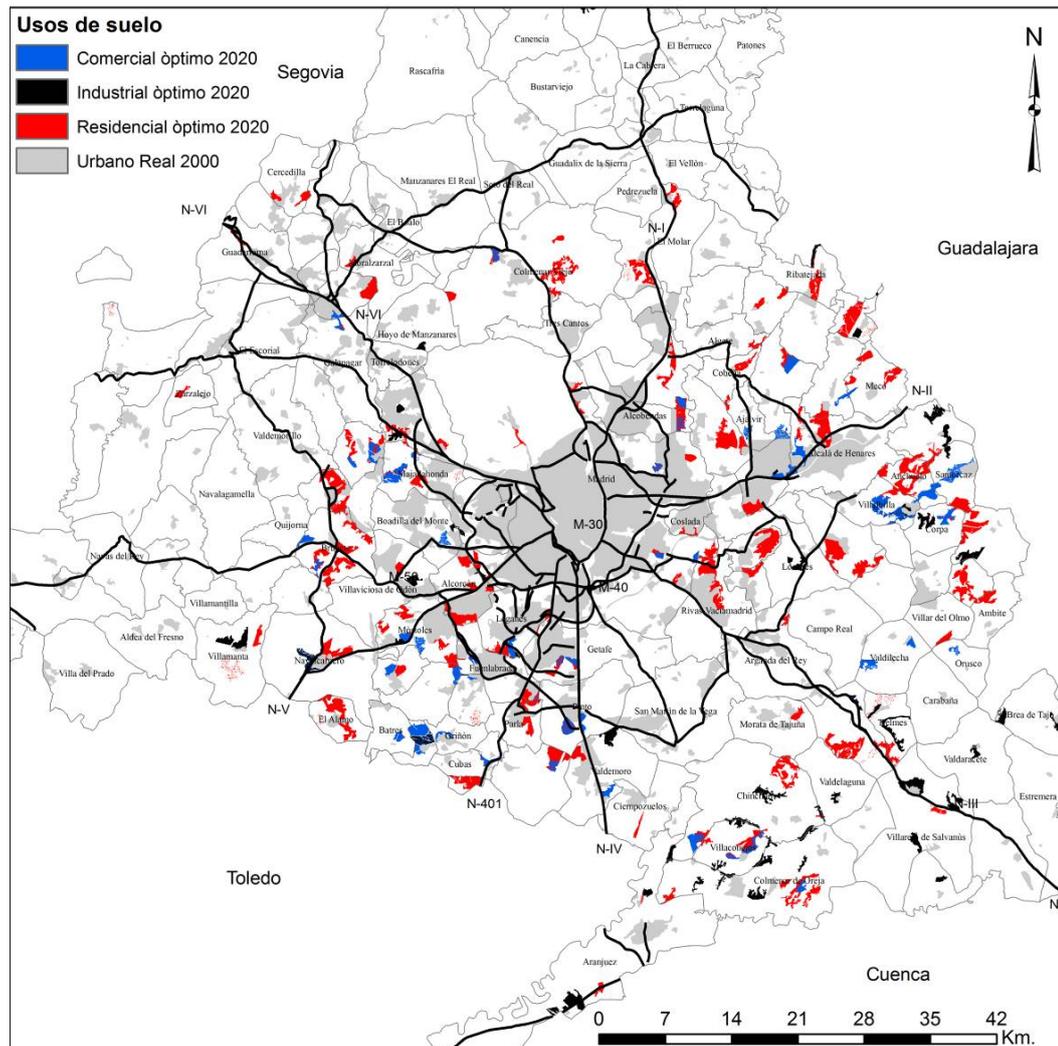


Figura 6. Resultados del modelo de asignación óptima de nuevos desarrollos urbanos para el año 2020, partiendo de la situación real en el año 2000.

Fuente. Datos del Corine Land Cover 2000 y elaboración propia

Otro aspecto a considerar en el análisis de los modelos de asignación es el consumo de los usos del suelo. En este sentido, se pudo apreciar que los modelos se nutren principalmente de usos de suelo que presentan un menor valor productivo, como son las tierras de labor en secano y la vegetación arbustiva. No obstante, un porcentaje de éstos también prolifera sobre pastizales naturales, localizados, principalmente, en el centro y sureste de la Comunidad (Figura 8). De este análisis se observó que las diferencias en cuanto al consumo de usos del suelo entre ambos modelos no son muy significativas, ya que ambos consumen prácticamente los mismos tipos de uso del suelo. Sin embargo, las diferencias en cuanto a la posición espacial de dicho consumo si que pueden ser un tanto más significativas (Figura 6 y 7), debido a que en un modelo se parte de la situación real del año 2000 y en el otro de lo óptimo para ese mismo año.

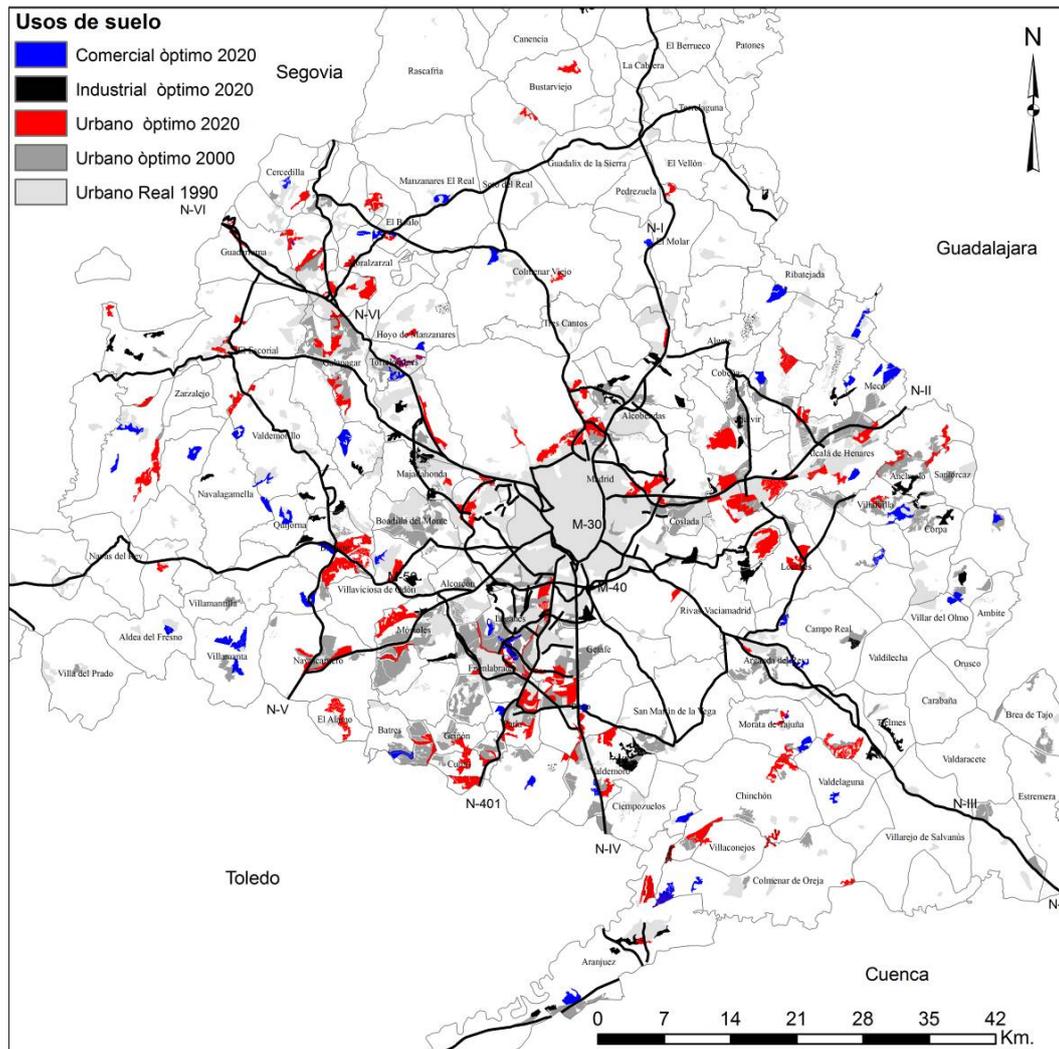


Figura 7. Resultados del modelo de asignación óptima de nuevos desarrollos urbanos para el año 2020, partiendo de los resultados de asignación “óptima” para el año 2000.

Fuente. Datos del Corine Land Cover 2000 y elaboración propia

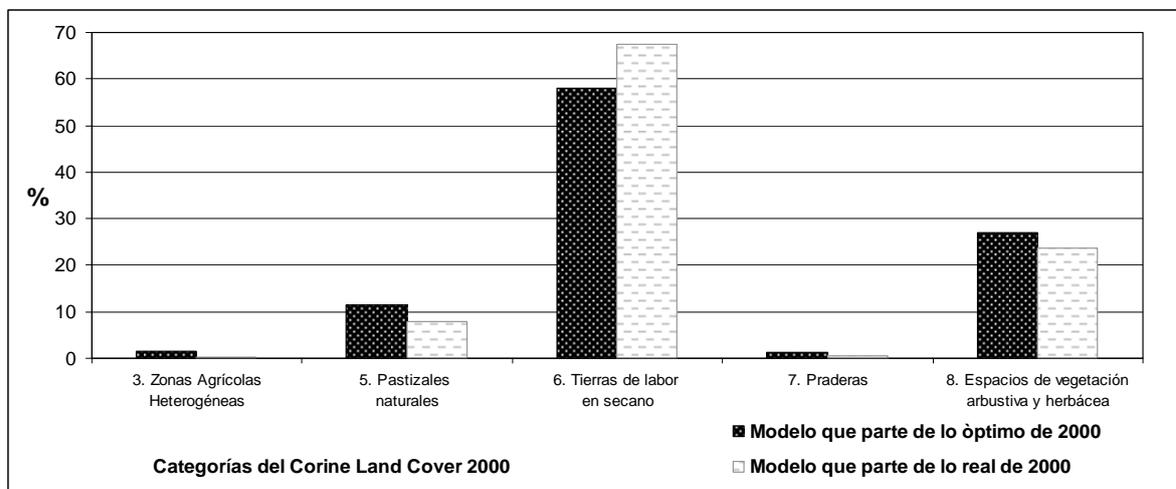


Figura 8. Consumo de usos de suelo para ambos modelos al 2020.

6. CONCLUSIONES

Podemos decir que en el presente estudio se ha desarrollado y aplicado con éxito un modelo de asignación óptima de zonas residenciales, comerciales e industriales en la Comunidad de Madrid para diferentes periodos, utilizando algunos aspectos metodológicos novedosos. Aún cuando las técnicas de evaluación multicriterio han sido ampliamente aplicadas en la asignación de nuevos usos del suelo, cabe destacar el hecho de que en el procesamiento de algunos factores se aplicaron procesos innovadores en el desarrollo de modelos normativos. Al respecto, se puede mencionar la modelización de los factores: usos del suelo, accesibilidad a zonas urbanas y la distancia ponderada a la población; así como la utilización de estos modelos normativos para elaborar escenarios de futuro.

Dichos modelos han sido implementados contando con una cantidad considerable de factores (obtenidos de una recopilación de variables espaciales tratadas en un SIG), que nos han permitido incluir ciertos criterios de sostenibilidad. Así, la inclusión de la zonificación de la variable usos de suelo y el factor de accesibilidad a los núcleos urbanos, fue determinante en la asignación de los nuevos usos residenciales, comerciales e industriales, permitiendo proteger espacios de productividad agraria en la sierra de Madrid y zonas de importancia agrícola en la parte sur de la Comunidad, así como dar prioridad de desarrollo a los municipios de tamaño medio e intermedio. Del mismo modo, los factores de accesibilidad a zonas comerciales y la distancia ponderada a la población con poder adquisitivo hace que las nuevas zonas comerciales se ubiquen a distancias considerables entre ellas y cerca de las nuevas zonas urbanas, mientras que el factor de distancia ponderada a la población más vulnerable, hace que las zonas industriales se localicen en lugares con menor densidad de población.

También se observó que el uso del mapa de zonas no urbanizables de protección como restricción condiciona la asignación óptima de las nuevas zonas urbanas y esto quizá no garantice que los nuevos usos se asignen en los sitios de mayor adecuación, no obstante da un sustento realista y objetivo a la simulación de los modelos de crecimiento urbano deseables.

Se puede concluir que los dos escenarios planteados a partir del año 2000 presentan cierta compacidad en la distribución de los nuevos usos del suelo, lo cual da un carácter sostenible al territorio madrileño en el futuro. Pero además, se está garantizando que estos

usos se asignen, según los factores planteados, en las mejores condiciones ambientales, económicas y sociales y dentro de un marco legal establecido por los entes planificadores del territorio.

Por último, señalar que la herramienta *BuildScenary* fue de gran utilidad al momento de llevar a cabo la asignación de los usos de suelo, permitiendo optimizar recursos informáticos y tiempo de desarrollo de los modelos.

7. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación “SIMURBAN: Análisis y simulación prospectiva mediante Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) del crecimiento urbano actual. Evaluación de su sostenibilidad”, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC España) a través de la convocatoria 2006 de proyectos del Plan nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación 2004-2007, Programa nacional de Ciencias Sociales, Económicas y Jurídicas (referencia SEJ2007-66608-C04- 00/ GEOG).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera Benavente, F., Plata Rocha, W., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M. (2009): “Hacia la simulación de escenarios futuros de demanda de ocupación de suelo en ámbitos metropolitanos”, *II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad*, Terrassa, España.
- Aldana, A.T. (2005): “Cartografía de los cambios en las cubiertas artificiales de la Comunidad de Madrid-España”, *Revista forestal latinoamericana*, N° 35, pp. 59-86.
- Al-Shalabi, M. A., Mansor, S. B., Ahmed, N. B., Shiriff, R. (2006): “GIS based multicriterio approaches to housing site suitability assessment”, *XXIII International FIG Congress, Munich, Germany*. [Consulta: 10-10-2009]. Disponible en http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ts72/ts72_05_alshalabi_etal%20_0702.pdf
- Baja, S., Chapman, D. M., Dragovich, D. (2007): “Spatial based compromise programming for multiple criteria decision making in land use planning”, *Environment Model Assess*, 12, pp. 171-184.
- Barredo Cano, J. I. (1996): *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*, Madrid, Ed. RA-MA.
- Barredo Cano, J. I. y Bosque Sendra, J. (1999): “Multicriteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment”, *Geographical Systems*, 5, pp. 313-327.

- Barredo Cano, J. I. y Gómez Delgado, M. (2008): "Towards a set of IPCC SRES urban land-use scenarios: modelling urban land-use in the Madrid región", en Paegelow, M. y Camacho Olmedo, M. T. (Ed.): *Modelling Environmental Dynamics, Advances in Geomatic Solutions*, Springer, pp. 363- 385.
- Borouhaki, S. y Malczewski, J. (2008): "Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS", *Computers and Geosciences*, 32, pp. 399-401.
- Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., Rodríguez Espinosa, V. R., Díaz Muñoz, M. A., Rodríguez Duran, A. E., Vela Gayo, A. (1999): "Localización de centros de tratamientos de residuos: una propuesta metodológica basada en SIG", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 19, pp. 295-323.
- 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*, 87, 139–153.
- Comisión Europea (1999): Estrategia Territorial Europea. Hacia un desarrollo equilibrado y sostenible de la UE. [Consulta: 10-10-2009]. Disponible en http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum_es.pdf
- Diamantini, C. y Zanon, B. (2000): "Planning the urban sustainable development. The case of the plan for the province of Trento, Italy", *Environmental Impact Assessment Review*, 20, pp. 299-310.
- Eastman, J. R. (2006): "The IDRISI Andes Tutorial", *IDRISI Production*, 1987-2006, Clark University.
- Eastman, J. R., Jin, W., K. Kyem, P. A. y Toledano, J. (1995): "Raster procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions", *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, 61, (5), pp. 539/547.
- Encinas Escribano, A., Winder, N., Hernández Jiménez, V., Martínez Alonso, L., Hernández Medina, C. y Garrido Valero, M. S. (2005): "Hacia una planificación territorial sostenible en la Comunidad de Madrid: Directrices y Recomendaciones". Universidad Europea de Madrid and University of Newcastle, Madrid.
- EEA (European Environment Agency) (2006): Urban sprawl in Europe, the ignored challenge. EEA Report No 10/2006.
- Franco Maass y Bosque Sendra (1997): "Procedimiento para la obtención de parcelas de adecuación en imágenes raster", *I Reunión de usuarios Españoles de Idrisi*, Alcalá de Henares, España. [Consulta: 05-10-2009]. Disponible en <http://www.sigte.udg.es/idrisi/recursos/secundari/reunion1/inidice.htm>.
- García Palomares, J.C. y Gutiérrez Puebla, J. (2007): "La ciudad dispersa: cambios recientes en los espacios residenciales de la Comunidad de Madrid" *Anales de Geografía*, vol. 27, nº 1, pp. 45-67.

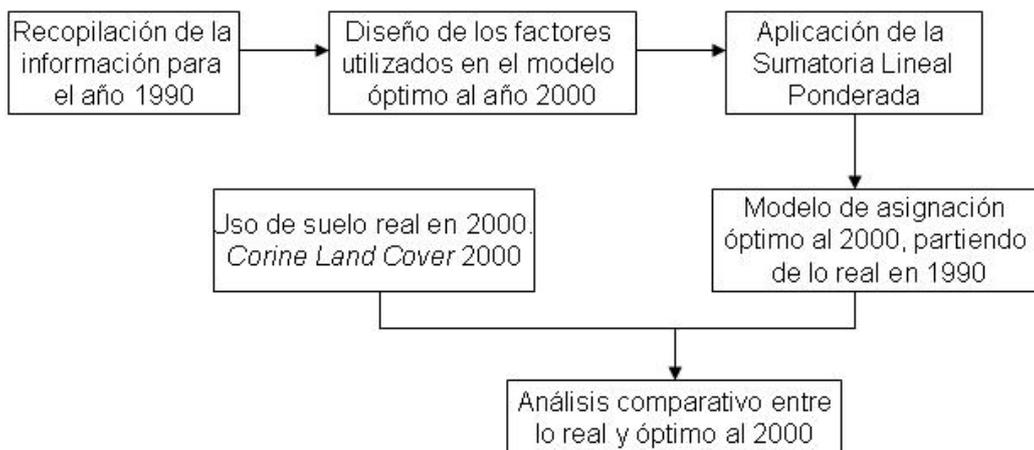
- Geneletti, D. y van Duren, I. (2008): “Protected area zoning for conservation land use: A combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation” *Landscape and Urban Planning* 85, pp. 97-110.
- Giordano, L. C. y Riedel, P. S. (2008): “Multi-criteria spatial decision analysis for demarcation of greenway: A case study of the city of Rio Claro, Sao Paulo, Brazil”, *Landscape and Urban Planning*, 84, pp. 301-311.
- Gómez Delgado, M. (2003): *Sistemas de Información Geográfica y toma de decisiones: control del riesgo a partir del Análisis de Sensibilidad y Análisis de Incertidumbre*, Tesis doctoral del Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá.
- Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2005): *Sistemas de Información Geografía y Evaluación Multicriterio aplicados al ordenamiento del territorio*, Madrid, Ed. Rama.
- Jiang, H. y Eastman, J. R. (2000): “Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS”, *International Journal of Geographical Information Science*, 14:2, pp. 173 – 184.
- Leboreiro, A. (1999): “De la teoría a la práctica en la planificación territorial”, *Urban*, 3, pp. 68-79.
- Ligmann-Zielinska, Arika, Church, Richard L., Jankowski, Piotr (2008): “Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation”, *International Journal of Geographical Information Science*, 22 (6), pp. 601 - 622.
- Liu, Y., Lv, X., Qin, X., Guo, H., Yu, Y., Wang, J., Mao, G. (2007): “An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe”, *Landscape and Urban Planning*, 82, pp. 233-246.
- López de Lucio, R (2003): “Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid”, *Urban*, 8, 124-161.
- López de Lucio, R. (2004): “Morfología y características de las nuevas periferias. Nueve paisajes residenciales en la región urbana de Madrid”, *Urban*, 9, pp. 56-80.
- López Vázquez, V. H., Bosque Sendra, J. y Gómez Delgado, M. (2008): “Flexibilidad de los SIG para asistir a la toma de decisiones espaciales”, *XI Coloquio Ibérico de Geografía*, Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, España.
- MacDonald, M. L. y Faber, B. (1999): Exploring the Potential of Multi-Criteria Spatial Decision Support Systems: A System for Sustainable Land-use Planning and Design. In *spatial Multicriteria Decision Making and analysis: A geographic information sciences approach*. Ed. Thill, J. C. Sydney, Ashgate: 253-377.
- Malczewski, J. (2002): “Fuzzy Screening for Land Suitability Analysis”, *Geographical & Environmental Modelling*, 6, 1, pp. 27-39.

- Malczewski, J., Chapman, T., Flegel, C., Walters, D., Shrubsole, D. y Healy, M.A., (2003): “GIS multicriteria evaluation with ordered weighted averaging (OWA): case study of developing watershed management strategies”, *Environment and Planning A*, 35, pp. 1769–1784.
- Malczewski, J. (2004): “GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview”, *Progress in Planning*, 62, pp. 3–65.
- Malczewski, J. (2006a): “Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8, pp. 270-277.
- Malczewski, J. (2006b): “GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature”, *International Journal of Geographical Information Science*, 20. (7), 703-726.
- Marinoni, O. (2004): “Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS”, *Computers & Geosciences*, 30, pp. 637-646.
- Martínez Falero, J. E. (2002): “La agricultura y la ganadería de Madrid frente a los nuevos retos: Medio ambiente, tecnología y economía”, *Libro Blanco de la Agricultura y el Desarrollo Rural*, Jornada Autonómica de la Comunidad de Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. [Consulta: 20-10-2009]. Disponible en http://www.libroblancoagricultura.com/libroblanco/jautonomica/madrid/ponencias/pdf/je_martinez.pdf
- MAYPA (2004): Libro blanco en Agricultura y Desarrollo Rural. Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. [Consulta: 20-09-2009]. Disponible en <http://www.libroblancoagricultura.com/>
- Molero Melgarejo, E., Grindlay Moreno, A. L. Asensio Rodríguez, J. J. (2007): “Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio”, *GeoFocus*, 7, pp. 120 - 147.
- Oñate Cid, J. M. (2002): “Agricultura en Madrid”, *Libro blanco de la Agricultura y el Desarrollo Rural*, Jornada Autonómica de la Comunidad de Madrid, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. [Consulta: 20-10-2009]. Disponible en http://www.libroblancoagricultura.com/libroblanco/jautonomica/madrid/comunicaciones/o_nate.pdf
- OSE, Observatorio de la Sostenibilidad en España (2006): *Cambios de ocupación del suelo en España. Implicaciones para la sostenibilidad*. Alcalá de Henares, OSE.
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T. y Menor Toribio, J. (2003): “Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje”, *GeoFocus*, 3, 2003, pp. 22-44.
- Pettit, C. J. (2002): *Land use planning scenarios for urban growth: a case study approach*, Phd Thesis. University of Queensland.

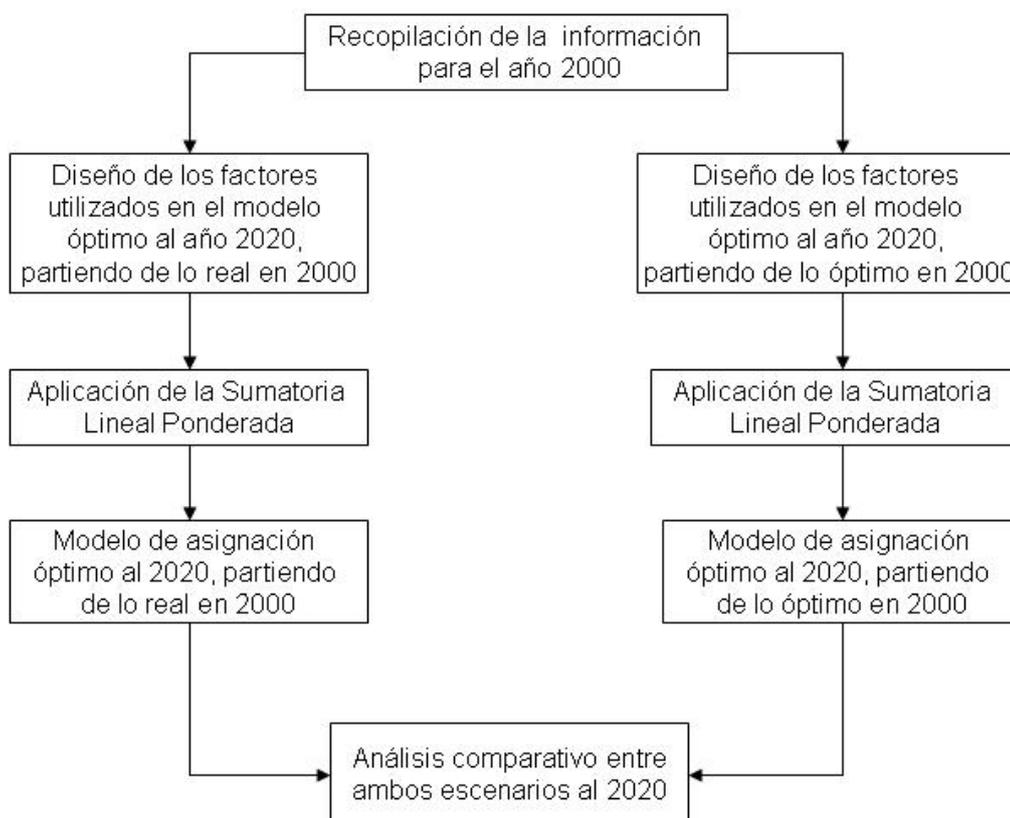
- Phua, M. H. y Minowa, M. (2005): “A GIS-based multi-criteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: a case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia”, *Landscape and Urban Planning*, 71, pp. 207-222.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2009): “Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la comunidad de Madrid (1990-2000)”. *Scripta-Nova*, volumen XIII, num. 293. [Consulta: 20-09-2009]. Disponible en <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-293.htm>
- Rodríguez Álvarez, Y., Plata Rocha, W., Salado García, M. J., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2009): “Herramienta para la asignación óptima de usos del suelo”, *II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad*, Terrassa, España.
- Rueda, S. (2002): *Barcelona, ciudad mediterránea, compacta y compleja: una visión de futuro más sostenible*. [Consulta: 28-10-2006]. Disponible en http://www.bcnecologia.net/index.php?option=com_content&task=view&id=108&Itemid=76&lang=SP.
- Salado García, M. J., Rojas Quezada, C., de Carvalho Cantergiani, C. (2008): “Modelos territoriales y sistemas de indicadores de sostenibilidad. Valoración crítica de algunas experiencias concretas”, *Serie Geográfica*, 14, pp. 131-145.
- Santiago Rodríguez, E. de (2007): “Madrid, ‘ciudad única’. Pautas y lógicas espaciales recientes en la región madrileña”, *Urban*, nº 12, pp. 8-33.
- Svoray, t., Bar, P. y Bannet, T. (2005): “Urban land-use allocation in a Mediterranean ecotone: Habitat Heterogeneity Model incorporated in a GIS using a multi-criteria mechanism”, *Landscape and Urban Planning*, 72, pp. 337-351.
- Wu, F. y Webster, C. J. (1998): “Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25, pp. 103–126.
- Yager, R. R. y Kelman, A. (1999): “An extension of the analytical hierarchy process using OWA operators”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 7 (4), pp. 401 – 417.
- Yeh, A. G. O y Li, X. (2001): “A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28, pp. 733–753.

APÉNDICE 1. Esquema metodológico seguido para la obtención de los modelos de crecimiento urbano óptimos

Modelo de asignación óptimo al 2000



Modelos de asignación óptimo al 2020



ANEXOS COMPLEMENTARIOS

Anexo 4

Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos

Publicación:

Aguilera Benavente, F., **Plata Rocha, W.**, Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M. (2009). “Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos”, *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 4, pp. 57-80. <http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/8535/1/aguilera.pdf>

RESUMEN

La generación y simulación de escenarios exploratorios externos es un instrumento útil en los procesos de planificación y toma de decisiones, de especial relevancia en el ámbito territorial y metropolitano (Peterson *et al.*, 2003; Pettit y Pullar, 2004; Luca, 2007; Carsjens, 2009), cuyo calado en el proceso de planificación en España es escaso hasta la fecha (Valenzuela *et al.*, 2008).

En este artículo se presenta un modelo basado en Dinámica de Sistemas para estimar las demandas de nuevo suelo urbano en ámbitos metropolitanos. El modelo se ha desarrollado concretamente para dos ámbitos metropolitanos españoles (Región Urbana de Madrid y Área Metropolitana de Granada) para los cuales se ha realizado un proceso de calibración individual.

Una vez calibrado el modelo para dichos ámbitos, y a través del planteamiento de tres escenarios futuros, se han simulado las posibles tendencias de las demandas de ocupación urbana que podrían derivarse de las premisas establecidas en cada escenario, con unos resultados satisfactorios. Dichos resultados podrán ser empleados en otros trabajos que permitirán localizar espacialmente, mediante modelos de simulación espacial, las demandas estimadas, para mostrar y evaluar posibles consecuencias espaciales y territoriales de los procesos de crecimiento metropolitano.

Palabras clave: Simulación de escenarios, Escenarios exploratorios externos, Dinámica de sistemas, Planificación, Áreas metropolitanas.

ABSTRACT

The design and development of future explorative external scenarios are useful tools for the spatial planning and even more for the metropolitan planning (Peterson *et al.*, 2003; Pettit y Pullar, 2004; Luca, 2007; Carsjens, 2009). However, spatial planning policy and practices in Spain lack of this instruments (Valenzuela *et al.*, 2008).

This paper shows a System Dynamics-based model designed to estimate urban growth demands in metropolitan areas. This model has been specifically developed for Madrid and Granada metropolitan areas (Spain), where the model has been calibrated.

After the calibration, three future urban growth demands scenarios has been designed and simulated using the model developed. The urban growth demands obtained may be used in later research to spatially locate that demands using spatial simulation models.

Keywords: Scenario planning, Explorative external scenarios, System dynamics, Spatial planning, Metropolitan areas.

1. INTRODUCCIÓN: DINÁMICA DE SISTEMAS Y SIG EN LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS PARA LA PLANIFICACIÓN METROPOLITANA

La generación y simulación de escenarios exploratorios externos¹ es un instrumento útil en los procesos de planificación y toma de decisiones en el ámbito territorial y metropolitano (Peterson *et al.*, 2003; Pettit y Pullar, 2004; Luca, 2007; Carsjens, 2009) que se encuentra bien extendido en el contexto europeo (ESPON Project 3.2, 2006), formando parte de enfoques de la planificación como el *scenario planning* (Stillwell *et al.*, 1999). Estos instrumentos pueden ayudar a disminuir la incertidumbre inherente al proceso de planificación (Prato, 2007; Aguilera, 2008; Carsjens, 2009), especialmente en momentos como los actuales. Sin embargo, su falta de aplicación en el contexto metropolitano español, queda patente en la mayor parte de los documentos de planificación existentes tanto a escala regional, supramunicipal o local (Soria *et al.*, 2009), siendo los dos ámbitos de estudio seleccionados en este trabajo claros ejemplos de ello.

Es posible achacar en cierta forma la incapacidad del planeamiento metropolitano español (De Miguel, 2008) a la falta de innovación metodológica en el empleo de instrumentos de este tipo. En este sentido consideramos oportuno explorar las posibilidades de aplicación de instrumentos útiles para el proceso de planificación metropolitana en España tales como el diseño de modelos de simulación (Aguilera, 2008), la generación de los escenarios normativos o exploratorios (Nijkamp y Blaas, 1994, Borjerson *et al.*, 2006), o el empleo de modelos de ayuda a la decisión (Hendriks y Vriens, 2000) o de ayuda a la planificación (Carsjens, 2009), especialmente ante etapas de gran desarrollo metropolitano como las acontecidas en los últimos años (OSE, 2006) y/o las situaciones de incertidumbre como la actual.

Algunas de las herramientas más importantes que pueden emplearse para la concreción de instrumentos como los escenarios futuros son, entre otras, la Dinámica de Sistemas (DS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En primer lugar los SIG, de acuerdo con su elevada capacidad de análisis y de integración de diversas fuentes de

¹ Entendidos como escenarios posibles (es decir, que se mueven en el pensamiento futuro de lo hipotético) en los que los factores condicionantes se encuentran del alcance de la acción del planificador (en este caso se trata de factores en relación con la situación socioeconómica).

información geográfica, proporcionan un soporte amplio para el diseño y aplicación de modelos de localización óptima (Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005), o los modelos de simulación espacial de la expansión urbana (Aguilera, 2008; Barredo Cano y Gómez Delgado, 2008) en el que la componente espacial de la información geográfica es fundamental. Sin embargo, uno de los principales hándicap que presentan los SIG en este campo lo constituye la inherente dificultad para el tratamiento de la cuestión temporal (Ott y Swiaczny 2001; López Klocker y Bosque Sendra, 2005).

La dinámica de sistemas por su parte, sin una preocupación expresa por el tratamiento de las cuestiones espaciales, se presenta como un instrumento útil para el estudio del comportamiento de sistemas complejos a partir de la identificación de las relaciones entre la estructura del sistema, su comportamiento y la determinación de los valores que las variables adoptan, a lo largo del tiempo (Aracil y Gordillo 1997). No en vano, algunas de las primeras aplicaciones de la DS fueron en el campo de los sistemas urbanos (Forrester, 1969).

Así pues, de acuerdo con el enfoque temporal de la DS y el eminentemente espacial de los SIG, es posible abordar a partir del uso conjunto de estas herramientas, procesos de generación y simulación temporal y espacial de escenarios aplicados a la planificación territorial y metropolitana, línea de una relevancia importante como revelan proyectos Europeos como PLUREL (Ravetz, 2009), PRELUDE (JRC, 2007) o ESPON 3.2 (2006) impulsados por la Comisión Europea.

Este trabajo, y de acuerdo con lo anteriormente expuesto, tiene como objetivo principal el diseño de tres escenarios externos futuros (Devorg, 2004; Borjerson *et al.*, 2006) en relación con el contexto socioeconómico, así como la simulación de las demandas de crecimiento metropolitano para los tres escenarios en dos áreas metropolitanas Españolas. Estas áreas, de características muy diferentes, son la región urbana de Madrid y el Área Metropolitana de Granada. Al tratarse de escenarios prospectivos externos, y de acuerdo con Borjerson *et al.*, (2006) deben ser entendidos en el contexto del pensamiento futuro exploratorio, y por tanto posible, pero nunca como una realidad futura. La representación de estos futuros hipotéticos permite esclarecer la acción presente (planificadora) a la luz de futuros posibles (Goded, 2000) y, por tanto constituye un enfoque exploratorio, y no normativo.

Para ello se construirá un modelo sencillo que pueda generar valores de demanda de ocupación del suelo en entornos metropolitanos, para el que no se considerarán limitaciones físicas, a partir de variables de fácil disponibilidad, principalmente de naturaleza socioeconómica, que permitan la simulación de las condiciones establecidas en los tres escenarios y por tanto su materialización en diferentes intensidades de ocupación urbana asociadas.

2. ÁMBITO DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA

2.1. Ámbito de estudio: las áreas metropolitanas de Madrid y Granada

El ámbito de estudio y laboratorio de pruebas del modelo de simulación de demandas y de escenarios de desarrollo territorial está configurado por dos áreas metropolitanas españolas de características diferentes, como son la Región Urbana de Madrid y la Aglomeración Urbana de Granada, que bien pueden ser ejemplo de las grandes áreas metropolitanas consolidadas Españolas (Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla, Bilbao) o las nuevas áreas metropolitanas emergentes (Málaga, Vigo-Pontevedra, Elche-Alicante, etc.) (Feria, 2004).

Con respecto a la Comunidad de Madrid, ésta tiene una extensión territorial de 8.025 km² (Figura 1), repartida en un total de 179 municipios. Su población estimada es de aproximadamente 6 millones de habitantes (INE, 2005), gran parte de la cual se concentra en el área metropolitana, aunque a partir de la década de 1990 se evidenciaron fuertes procesos de descentralización hacia algunos municipios del oeste, norte y sureste de la región, que incidieron en el desarrollo de nuevos espacios urbanos.

El sector productivo (industrial y comercial) está caracterizado por una distribución espacial cada vez más extensa, dispersa y fragmentada, lo que conlleva a crecientes necesidades de transporte, tanto para los trabajadores y sobre todo para las mercancías (Gutiérrez Puebla, 2004, De Santiago, 2007). Esto a su vez también produjo una importante ampliación de la infraestructura de transporte, donde cabe mencionar que hacia el año 2000 la red vial alcanzaba aproximadamente 584 kilómetros de extensión mientras que la red de metro y ferrocarriles se acercaba a los 530 kilómetros, posicionándose como la segunda infraestructura de transporte más importante de la región (López de Lucio, 2003).

En este contexto la Comunidad de Madrid se consolida como uno de los territorios de mayor dinamismo del arco mediterráneo, con un crecimiento de las superficies artificiales aproximado del 48 % durante la década de los 90, muy lejos del 25 % de crecimiento medio registrado en el territorio nacional y del 5,4 % de la Unión Europea (EEA, 2006; OSE, 2006; Plata *et al.*, 2009), fenómeno que no ha venido acompañado del mismo crecimiento en términos de población, pues ésta sólo creció un 9 % entre las mismas fechas.

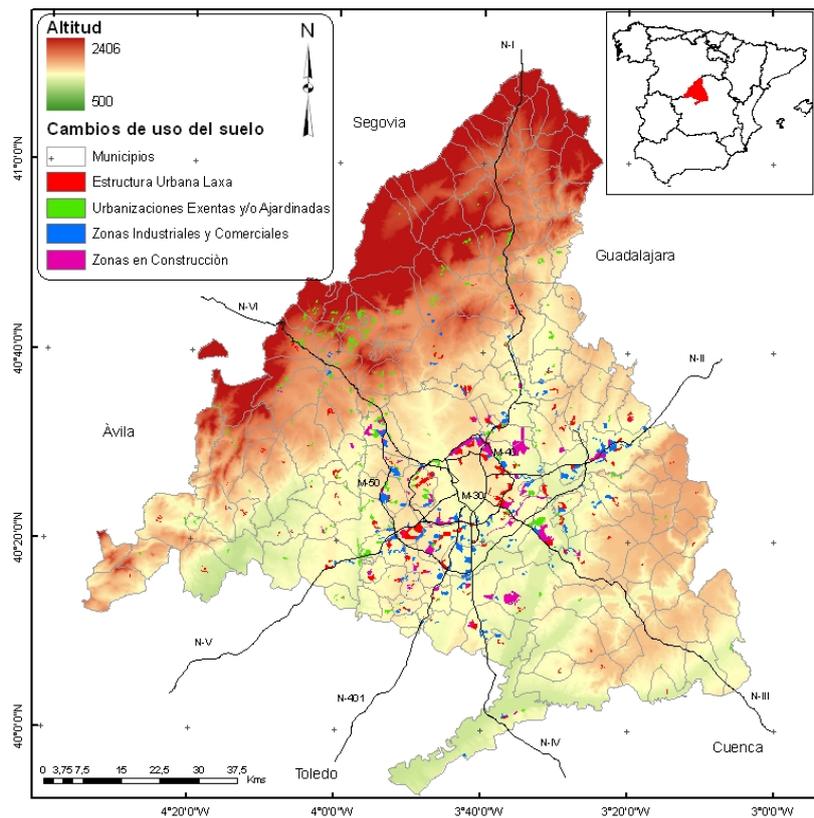


Figura 1. El área metropolitana de Madrid

Fuente. Elaboración propia a partir del CLC1990 y 2000. Instituto Geográfico Nacional, España

Por su parte, el Área de Metropolitana de Granada (Figura 2), tradicionalmente denominada comarca de la Vega de Granada, con una superficie de 859,34 km² y 32 municipios (Consejería de Obras Públicas, 1999), ha experimentado en las últimas décadas una serie de transformaciones especialmente vinculadas a la ocupación de suelo con funciones urbanas (Aguilera, 2008). Situada en la depresión del río Genil, en el sudeste de la península Ibérica, dicha región posee un importante valor agro-productivo (Menor, 2000), de tal forma que su organización territorial a lo largo de la historia ha

reflejado la importancia económica de la explotación agraria, que sin embargo se encuentra en franca regresión (Consejería de Obras Públicas, 1999; Fernández, 2004).

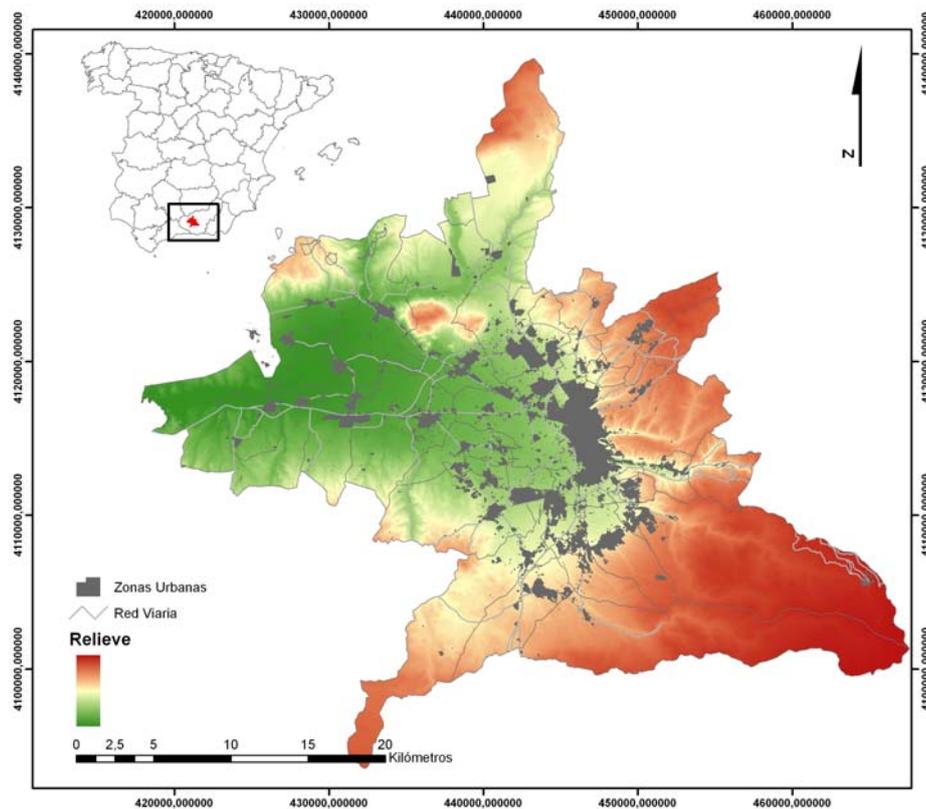


Figura 2. El área metropolitana de Granada

Fuente. Elaboración propia a partir del CLC1990 y 2000. Instituto Geográfico Nacional, España

Tradicionalmente, y hasta dicha década de los 70, la población, servicios y actividades se concentraban en la ciudad de Granada, mientras que a su alrededor orbitaban en torno a una decena de pequeños núcleos urbanos de marcado carácter agrícola. Sin embargo, desde finales de la década de los 70 y comienzos de la de los 80, de acuerdo con un proceso de aceleración de la ocupación de suelo (incremento de la ocupación urbana del 117 %; Aguilera, 2008), una política de incremento de las infraestructuras de la movilidad, y un declive de la producción agrícola, dicha comarca ha dado lugar a la realidad metropolitana actual que, como tercera área metropolitana de Andalucía, alberga una población superior al medio millón de habitantes (INE, 2008).

2.2. Los datos de partida

El diseño de un modelo de simulación para estudiar los cambios que tienen lugar en un área metropolitana, de naturaleza especialmente compleja (Verburg *et al.*, 2004),

requiere del planteamiento previo de un conjunto de factores con posible influencia en el proceso de cambio en cuestión (Cheng y Masser, 2003).

De acuerdo con el enfoque del trabajo, que se aleja de la dimensión espacial en esta primera etapa², el conjunto de variables seleccionado resume de manera muy sencilla algunos de los posibles factores motrices del crecimiento en las áreas metropolitanas de Granada y Madrid, además de ser fácilmente accesibles, haciendo reproducible los resultados obtenidos en otros ámbitos metropolitanos. Así pues, la mayor parte de estos datos pueden ser obtenidos a través del Instituto Nacional de Estadística, así como de los Institutos de Estadística regionales de las diferentes comunidades autónomas.

El conjunto comprende variables que van desde los valores de nacimientos y defunciones, hasta los valores de renta, pasando por el número de viviendas, o el número de hogares. Estos factores quedan recogidos en la tabla 1, en la que además se han dividido entre *variables primarias*, las cuales se han obtenido directamente de la información estadística disponible; *variables derivadas*, obtenidas a partir y por combinación de las variables básicas, y *variables de calibración*, cuyo valor se obtiene a partir de observaciones empíricas del cambio experimentado en períodos pasados. Igualmente se ha recogido en dicha tabla el tipo de instrumento con el que dicha variable se ha implementado en el modelo de DS elaborado (*niveles, flujos, variables auxiliares y tasas*).

3. METODOLOGÍA: EL MODELO DE DS Y LA GENERACIÓN DE LOS ESCENARIOS FUTUROS

3.1. Descripción del modelo. El funcionamiento del modelo

Desde el punto de vista del diseño conceptual del modelo, éste se compone de 3 bloques básicos que al relacionarse entre sí dan lugar a otros dos bloques que generan los resultados finales del modelo. Éste ha sido implementado en el software Vensim PLE (Ventana Systems, Inc), dado su facilidad de manejo, amplia difusión, disponibilidad y gratuidad, además por su puesto de su diseño específico para el trabajo con modelos basados en Dinámica de Sistemas.

² El Proyecto SIMURBAN en ulteriores etapas trabajará con modelos de simulación espacial para ubicar las diferentes demandas de crecimiento establecidas en los escenarios planteados en este trabajo.

**Tabla 1. Variables empleadas en el modelo y sus principales características
(Fuente IECM e IEA)**

| Variable | Nombre | Descripción | Unidades | Tipo de Variable | Tipo modelo |
|----------|----------------------------------|---|------------------------------|------------------|-------------------|
| POB | Población | Población | Personas | Primaria | Nivel |
| REN | Renta | Renta () | Euros | Primaria | Nivel |
| HOG | Hogares | Hogares | Nº de Hogares | Primaria | Nivel |
| SP | Suelo Productivo | Suelo comercial e industrial | Ha | Primaria | Nivel |
| SR | Suelo residencial | Suelo destinado a actividades residencial | Ha | Primaria | Nivel |
| NV | Número de viviendas | Número de viviendas totales | Nº de viviendas | Primaria | Nivel |
| TBN | Tasa Natalidad | Tasa de Natalidad en tanto por mil | Adimensional | Primaria | Tasa |
| TBM | Tasa Mortalidad | Tasa de Mortalidad en tanto por mil | Adimensional | Primaria | Tasa |
| TSM | Tasa Migratoria | Tasa Migratoria en tanto por mil | Adimensional | Derivada | Tasa |
| Nac | Nacimientos | Nacimientos obtenidos a partir de la TBN | Nº Nacimientos | Derivada | Flujo |
| Def | Defunciones | Defunciones obtenidas a partir de la TBM | Nº defunciones | Derivada | Flujo |
| SM | Saldo Migratorio | Saldo Migratorio | Nº inmigrantes | Derivada | Flujo |
| IncPOB | Aumento de la población | Incremento de Población | Nº de personas | Derivada | Variable auxiliar |
| PH | Personas por Hogar | Población entre Nº de Hogares en 1991 | Nº de personas | Derivada | Tasa |
| HECE | Hogares por cambio estructura | Nuevos hogares por escisión de núcleos familiares | Nº Hogares | Derivada | Tasa |
| NH | Nuevos Hogares | Igual a los nuevos hogares por cambio estructura más nuevos hogares por crecimiento poblacional | Nº de hogares/año | Derivada | Flujo |
| DesREN | Disminución de Renta | Disminución de la renta en euros por año | Euros/Año | Derivada | Flujo |
| IncREN | Incremento de Renta | Incremento de la renta en euros por año | Euros/Año | Derivada | Flujo |
| TincREN | Tasa de Incremento de renta | % de Aumento de la renta/año | % Euros/Año | Derivada | Tasa |
| TdesREN | Tasa de Disminución de renta | % de Descenso de la renta/año | % Euros/Año | Derivada | Tasa |
| VHR | Variación de renta por Habitante | Cambio en la renta en euros por persona | Euros/Persona | Derivada | Variable Auxiliar |
| AVR | Aumento de viviendas por renta | Población por renta por tasa de aumento vivienda/euro persona | Nº de Viviendas/euro persona | Derivada | Variable auxiliar |
| Nviv | Nuevas viviendas | Nuevas viviendas en el área metropolitana | Nº de Viviendas | Derivada | Flujo |
| SCV | Suelo consumido por vivienda | Se obtiene como cociente entre la superficie de suelo residencial y el número de viviendas | Metros cuadrados/vivienda | Derivada | Tasa |
| NSR | Nuevo suelo residencial | Nuevo suelo residencial por año | Metros cuadrados | Derivada | Variable auxiliar |
| NSPV | Suelo productivo por vivienda | Nuevo suelo productivo por año | Metros cuadrados/vivienda | Derivada | Tasa |
| ISP | Incremento Suelo productivo | Nuevo suelo productivo tanto industrial como comercial | Metros cuadrados | Derivada | Flujo |

En total constituyen 5 bloques diferenciados (Figura 3) pero interrelacionados entre sí.

- El primer bloque básico se encarga de estimar la evolución de la población en función de las tasas de natalidad, mortalidad y emigración.
- El segundo bloque aborda la modificación del número de hogares, producto de los cambios en la estructura familiar (escisiones de hogares, por ejemplo) así como de la evolución poblacional.
- El tercer bloque básico estima la evolución de los niveles de renta.

Como producto de la relación entre estos tres bloques los dos bloques resultado serán:

- Un bloque de estimación del número de viviendas y superficie urbana destinada a usos residenciales, como producto de la relación entre los bloques de evolución de los hogares y de evolución de niveles de renta.
- Un bloque de estimación de las superficies urbanas destinadas a usos productivos (industrial, comercial, servicios, ocio...), como producto tanto del tercer bloque básico (evolución del nivel de renta) así como del bloque de estimación de viviendas.

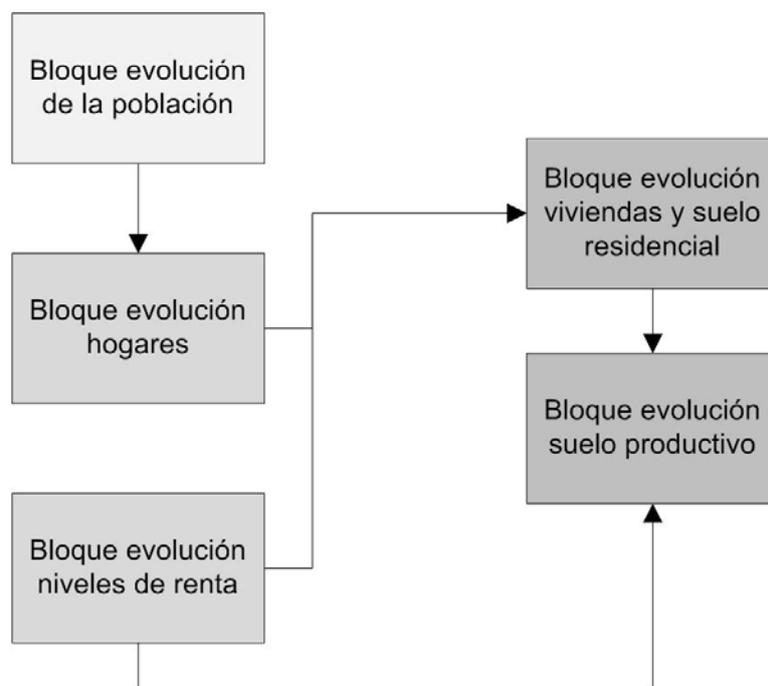


Figura 3. Diseño conceptual del modelo.

3.1.1. La estimación de la evolución de la población

El primero de los bloques básicos del modelo es de estimación de la evolución de la población. Este obtiene los crecimientos poblacionales a lo largo del tiempo mediante la

estimación del saldo migratorio, defunciones y nacimientos (flujos, en color verde), empleando para ello unas tasas de natalidad, mortalidad y migratoria que consideramos se mantienen constantes (en color rojo) (Figura 4). Igualmente, este bloque también permite estimar el incremento neto de población, que será almacenado a través de la variable auxiliar Incremento de población (en azul).

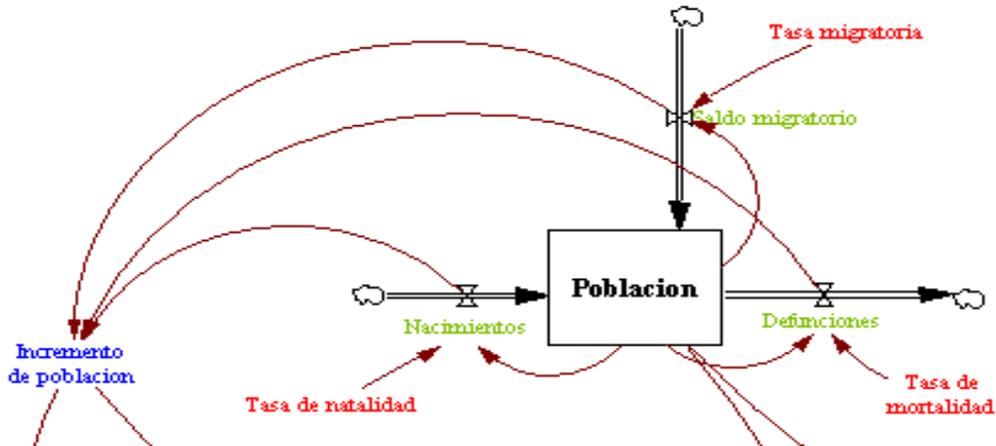


Figura 4. Bloque 1. Evolución de la población

3.1.2. La estimación de la evolución de los hogares

El segundo bloque estima el cambio en el número de hogares con el tiempo, empleando para ello diversas variables (Figura 5). En primer lugar, se estima el número de nuevos hogares como consecuencia de los crecimientos poblacionales estimados en el primer bloque. Para ello se divide el incremento de población entre un número de personas por hogar (en rojo). Igualmente se considera como factor de incremento del número de hogares la aparición de nuevos hogares generados por cambios en la estructura tradicional del hogar (disminución del número de personas por hogar, separaciones, etc.). Para ello se introduce la variable auxiliar “Hogares por escisión y cambio en la estructura” (HECE) que se ha calculado a partir de los nuevos hogares aparecidos en el período 1990-2000 que no se explican de acuerdo con el crecimiento poblacional, sino con una disminución del número de personas por hogar. Los nuevos hogares se obtendrían como la suma de los nuevos hogares producto del incremento poblacional, así como de los nuevos hogares por escisión de los existentes.

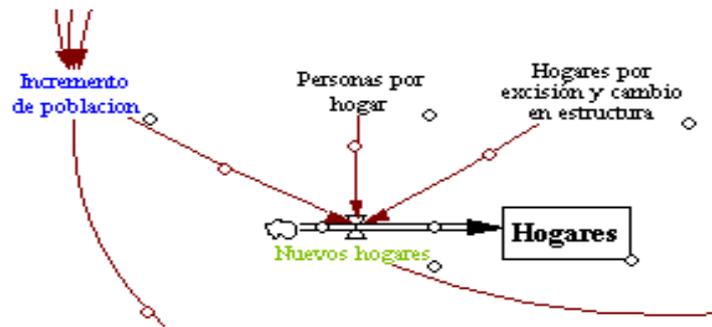


Figura 5. Bloque 2. La evolución del número de hogares

3.1.3. La estimación de la evolución de los niveles de renta

El tercero de los bloques básicos (Figura 6) estima el cambio de los valores de renta a partir del flujo del incremento de renta.

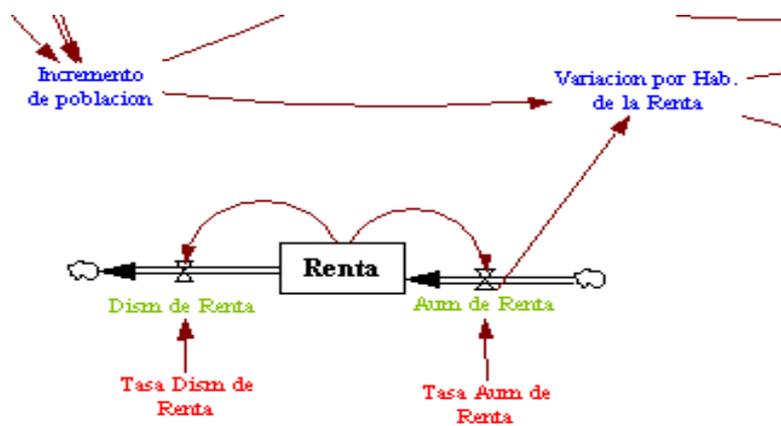


Figura 6. Bloque 3. Estimación de la evolución de los niveles de renta

3.1.4. La estimación de la evolución de las viviendas y el suelo residencial

El bloque de estimación de las viviendas y ocupación de suelo se apoya en los diferentes bloques básicos detallados anteriormente. Para ello estima el incremento de nuevas viviendas a partir de dos procesos: el incremento de viviendas motivado por el incremento de hogares, así como el incremento de viviendas con motivo del incremento de renta disponible (Figura 7).

La determinación del número de viviendas generadas por los nuevos hogares se apoyará en la estimación del número de hogares calculada en el segundo bloque (en azul) junto con una tasa de viviendas por hogar, que en principio se fijó de acuerdo con los valores existentes en 1991 (en rojo); así como en el número de viviendas generadas por el incremento de renta. Este valor deberá ser calibrado.

una tasa de incremento de suelo productivo por /incremento de renta, que deberá ser calibrada.



Figura 8. Bloque 5. Estimación de las demandas de suelo productivo

De esta forma, y de acuerdo con los bloques descritos anteriormente, la figura 9 muestra el aspecto final del modelo como relación de los comentados bloques.

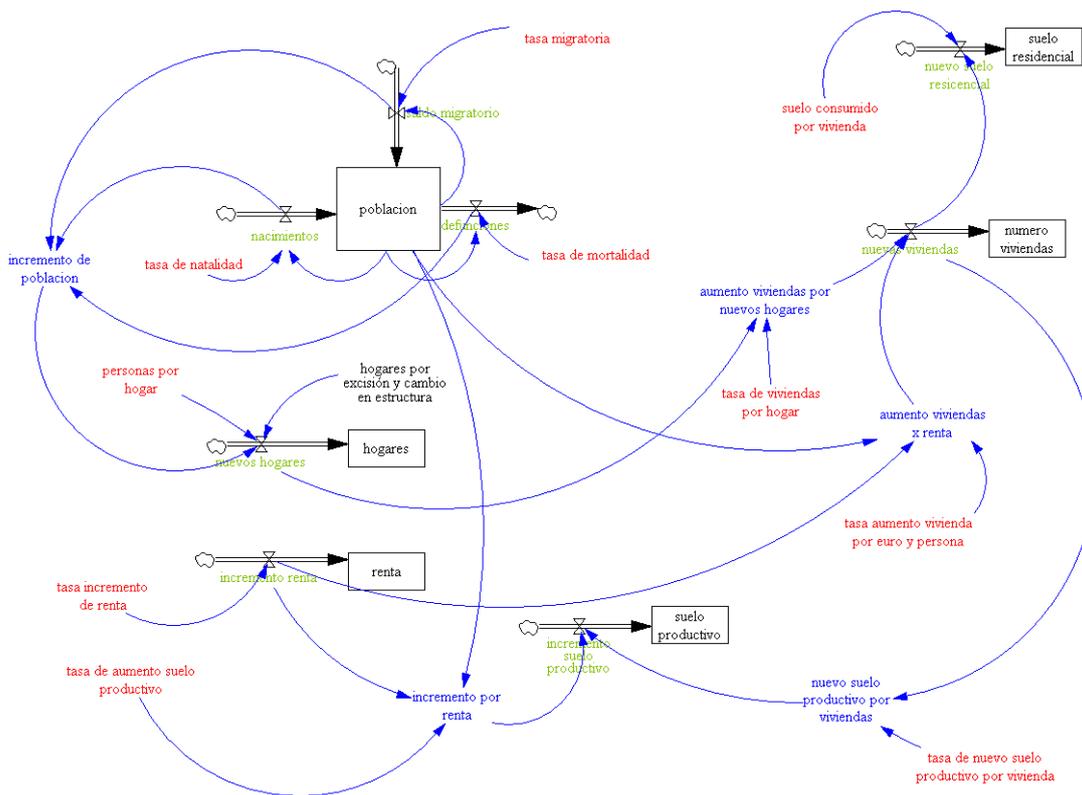


Figura 9. Aspecto del modelo implementado en el Software VenSIMPLE

En esta primera aproximación a la simulación de la demanda de crecimiento de suelo residencial y productivo, las interacciones implementadas en el modelo son solo en una dirección, de tal modo que no existe una modificación de las variables de entrada como podrían ser las tasas de natalidad o inmigración, o el incremento de renta por parte de

las variables de salida como las superficies residenciales o productivas. Estos aspectos se abordarán en sucesivas etapas de modificación del modelo propuesto.

3.2. La calibración del modelo

Para poder realizar las simulaciones de los escenarios futuros, así como para estimar los valores de algunas de las tasas comentadas anteriormente, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración del modelo que permita mostrar su capacidad para simular dinámicas pasadas de demanda de suelo urbano. Este proceso de calibración se ha desarrollado entre dos fechas, 1991 y 2001, para la cuál el volumen de información disponible era importante (datos socio-demográficos censales), así como por la disponibilidad de información cartográfica que permita valorar las superficies de suelos tanto residenciales como productivos (CORINE Land Cover 1990 y 2000). Este proceso de calibración además permitirá aplicar el mismo modelo a dos áreas metropolitanas de características y entidad claramente diferenciadas. Los valores de estas variables quedan recogidos en la tabla 2.

Tabla 2. Variables socio demográficas y de ocupación del suelo para Madrid y Granada

| Variables | Área Metropolitana de Madrid | Área Metropolitana de Granada |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Población 1991 (hab) | 4.947,555 | 408,444 |
| Población 2001 (hab) | 5.423,384 | 436,025 |
| Hogares 1991 | 1.534,362 | 118,969 |
| Hogares 2001 | 1.873,792 | 148,141 |
| Viviendas 1991 | 2.478,145 | 165,968 |
| Viviendas 2001 | 4.947,555 | 219,925 |
| Renta ³ 1991 | 31.319.804,03 | 3.091,15 |
| Renta 2001 | 60.502.118,95 | 4.993,03 |
| Suelo Residencial 1991 en ha | 41.801,75 | 5.292 |
| Suelo Residencial 2001 en ha | 56.127,25 | 6.155,89 |
| Suelo Productivo 1991 en ha | 6.486 | 795,20 |
| Suelo Productivo 2001 en ha | 14.195,75 | 1.048,25 |

³Los valores de renta para la Comunidad de Madrid: Renta bruta disponible en los hogares <http://www.madrid.org/iestadis/fijas/estructu/economicas/datosimpositivos/estructuirfdm.htm>. Los valores de renta para Granada están expresados en Renta declarada en el IRPF municipal/persona.

A partir de estos valores de las variables para el período 1991-2001, se han obtenido los valores medios observados de las diferentes tasas descritas tanto en la tabla 1 como a lo largo de la descripción del modelo. Con estos datos se han realizado diferentes simulaciones para el período 1991-2001, realizándose algunos pequeños ajustes en los valores de las diferentes variables (en particular de los valores de las tasas de calibración) para tratar de ajustar los resultados obtenidos por el modelo para el año 2001 a los cambios realmente acontecidos. En la tabla 3 se muestran los valores de las tasas calculados de acuerdo con los datos reales para 1991 y 2001, así como los valores obtenidos tras el proceso de calibración, tanto para el Área Metropolitana de Madrid como la de Granada.

Tabla 3. Cálculo de las tasas reales observadas y calibradas para la realización de las simulaciones 1990-2000

| Tasas | Valores Reales MADRID | Tasas Ajustadas MADRID | Tasas reales Granada | Tasas Ajustadas Granada |
|---|--------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Tasa de natalidad (TBN) | 0,011 | = | 0,012 | = |
| Tasa de mortalidad (TBM) | 0,00785 | = | 0,00785 | = |
| Tasa de saldo migratorio (TSM) | 0,004 | = | 0,00376 | = |
| Tasa de aumento de renta (TCR) | 6,36 % | = | 6,15 % | = |
| Tasa de decrecimiento de renta (TDR) | 0 | = | 0 | = |
| Tasa de aumento de suelo productivo (TASP) | 2,92023e-009 | = | 6,32822e-10 | = |
| Tasa de viviendas por hogar (TVH) | 1,29643 | = | 1,40 | = |
| Tasa de nuevo suelo productivo por vivienda (TNSPV) | 0,014 | 0,013 | 0,046 | 0,050 |
| Tasa de aumento de la vivienda por euro y persona (TAVEP) | 1,7174e-007 | = | 1,688e-006 | = |
| Personas por hogar (PH) | 3,06 | = | 3,19 | = |
| Hogares por escisión y cambio en estructura (HECE) | 33,943 | = | 2,114 | = |
| Suelo Consumido por vivienda (SCV) (ha) | 0,023 | 0,024 | 0,028 | = |

A partir de los valores reales para el año 1991 (Tabla 2) y los ajustados de las diferentes tasas para Madrid y Granada (Tabla 3), se han generado las simulaciones para el año 2000 empleando como datos de entrada los reales para el año 1991. La tabla 4 muestra los resultados para Granada y Madrid, así como el porcentaje de ajuste del modelo mediante su comparación con la situación real en el año 2000.

Tabla 4. Valores obtenidos tras el proceso de calibración 1991 – 2001 para Madrid y Granada

| | Población | Hogares | Renta | Viviendas | Suelo Residencial (ha) | Suelo Productivo (ha) |
|---------------------------------|------------------|----------------|---------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Madrid 1990 | 4.947.560 | 1.534.360 | 31.319.800 | 1.949.160 | 41.801,8 | 6.486 |
| Madrid 2000 | 5.312.910 | 1.993.190 | 58.023.300 | 2.544.620 | 55.427,0 | 14.833 |
| Madrid 2000 Estimado | 5.423.384 | 1.873.792 | 60.502.118,95 | 2.478.145 | 56.127,25 | 14.195,75 |
| % Ajuste sobre cambios 90-2000 | 76,8 | 64,8 | 91,5 | 87,4 | 99,8 | 99,5 |
| Granada 1990 | 408.444 | 118.969 | 3.091,15 | 165.968 | 5.292,00 | 795,20 |
| Granada 2000 | 436.025 | 148.141 | 4.989,14 | 219.925 | 6.155,89 | 1.048,25 |
| Granada 2000 Estimado | 437.579 | 148.603 | 4.992,95 | 211.179 | 6.196,23 | 1.021,7 |
| % Ajuste sobre cambio 1990-2000 | 94,4 | 98,4 | 99,9 | 83,8 | 95,3 | 89,5 |

3.3. Los escenarios futuros

Una vez establecida la calibración del modelo para el período 1991-2001, a continuación se describen los tres escenarios exploratorios externos que se plantean como posible evolución futura de la dinámica de las áreas metropolitanas de estudio, así como su relación con las diferentes variables manejadas por el modelo.

3.3.1. Escenario de tendencia

La superación de cualquier incertidumbre o crisis económica por parte del modelo que ha permitido el extraordinario desarrollo experimentado en los últimos 15 años, junto con el mantenimiento de la primacía de los intereses económicos sobre cuestiones ambientales o sociales, constituye la base del escenario de tendencia, considerando siempre que el año de partida es el año 2000.

Así pues, este escenario supone la confirmación y consolidación de los modelos e intensidades de crecimiento mostradas para el período 1990-2000. En este sentido, se establece un comportamiento que se mantendrá elevado en lo que respecta a las demandas de crecimiento de los suelos residenciales y productivos, de acuerdo con el mantenimiento de las tasas de incremento de la población (especialmente gracias a la tasa de inmigración), el alza de los niveles de renta disponibles, la favorable calificación de suelo establecida en los planeamientos y las altas demandas de suelo productivo (especialmente comercial y terciario) generadas por las nuevas viviendas.

3.3.2. Escenario de crisis

El agotamiento del modelo de desarrollo experimentado en los últimos años supone el advenimiento de un período dilatado de crisis con consecuencias importantes en los procesos de crecimiento metropolitano. De esta forma, este escenario supone un cambio importante en las formas, pautas e intensidades de crecimiento mostradas en los períodos anteriores. Las demandas de suelo productivo y residencial se verán ampliamente reducidas, como consecuencia de la menor presión demográfica (generada por un estancamiento del proceso migratorio), así como por la disminución en los incrementos de los niveles de renta, y unas pautas de crecimiento más compactas que disminuirán las zonas productivas asociadas a las zonas residenciales.

3.3.3. Escenario de innovación y sostenibilidad local

La búsqueda de nuevos modelos y fórmulas de crecimiento y diversificación económica dará lugar a un giro en el modelo de desarrollo metropolitano, en el que el crecimiento residencial predominante dará paso a un mayor desarrollo productivo que permita dar acogida al nuevo tejido empresarial de innovación que sustentará el crecimiento económico. Así pues, las demandas de suelo para crecimiento metropolitano se centran principalmente en el crecimiento de nuevas áreas productivas generadas por los incrementos de rentas derivadas de la innovación como motor económico, mientras que las demandas residenciales se ven reducidas de acuerdo con un mantenimiento de la población.

3.4. Escenarios futuros y variables del modelo de DS

Descritos los escenarios, es necesario explicitar sus diferencias a través de la modificación de las principales tasas que controlan el funcionamiento del modelo. La tabla 5 muestra los valores que se mantendrían constantes para los diferentes escenarios así como aquellos que se incrementarían, disminuirían o incluso se harían cero. Se trata de la tasa de saldo migratorio (TSM), tasa de aumento de renta (TCR), tasa de decrecimiento de renta (TDR), tasa de viviendas por hogar (TVH), tasa de nuevo suelo productivo por vivienda (TNSPV), suelo consumido por vivienda (SCV).

Para cada una de estas tasas propuestas para su modificación, se ha asignado un valor de cambio preliminar del 20 %, ya sea de incremento o disminución según corresponda.

Estos cambios son resultado de un análisis de sensibilidad previo, en el que se han valorado los cambios generados en las demandas con motivo de la modificación de los valores de las tasas, estimándose el 20 % como el valor más adecuado para generar escenarios de características diferenciales que por otra parte supongan unos cambios razonables en las tasas estimadas para el período 1990-2000.

Tabla 5. Cambios en las tasas para los diferentes escenarios futuros

| Tasas | Tendencia | Crisis | Innovación y Sostenibilidad |
|---|-----------|--------|-----------------------------|
| Tasa de natalidad (TBN) | = | = | = |
| Tasa de mortalidad (TBM) | = | = | = |
| Tasa de saldo migratorio (TSM) | = | ↓ | ↓ |
| Tasa de aumento de renta (TCR) | = | 0 | ↑ |
| Tasa de decrecimiento de renta (TDR) | = | ↑ | 0 |
| Tasa de aumento de suelo productivo (TASP) | = | = | = |
| Tasa de viviendas por hogar (TVH) | = | 1 | 1 |
| Tasa de nuevo suelo productivo por vivienda (TNSPV) | = | = | ↓ |
| Tasa de aumento de la vivienda por euro y persona (TAVEP) | = | = | = |
| Personas por hogar (PH) | = | = | = |
| Hogares por escisión y cambio en estructura (HECE) | = | = | = |
| Suelo Consumido por vivienda (SCV) (ha) | = | ↓ | ↓ |

Así pues, finalmente los valores empleados de las tasas para la simulación de los escenarios futuros quedan recogidos en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de las tasas para la simulación de los escenarios futuros

| Tasas | Madrid | | | Granada | | |
|-------|---------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------|---------------------------------------|
| | Escenario Tendencia | Escenario Crisis M | Escenario Innovación y Sostenibilidad | Escenario Tendencia | Escenario Crisis | Escenario Innovación y Sostenibilidad |
| TBN | 0,011 | = | = | 0,012 | = | = |
| TBM | 0,00785 | = | = | 0,00785 | = | = |
| TSM | 0,004 | 0,0032 | 0,0032 | 0,00376 | 0,003008 | 0,003008 |
| TCR | 0,063 | 0 | 0,076 | 0,061 | 0 | 0,073759 |
| TDR | 0 | 0,03 | 0 | 0 | 0,0123 | 0 |
| TASP | 2,92e-09 | = | = | 6,32e-10 | = | = |
| TVH | 1,29 | 1 | 1 | 1,40 | | |
| TNSPV | 0,0145 | = | 0,0112 | 0,05 | 0,05 | 0,04 |
| TAVEP | 1,72e-07 | = | = | 1,688e-006 | = | = |
| PH | 3,40 | = | = | 2,94 | = | = |
| HECE | 33,943 | = | = | 2,114 | = | = |
| SCV | 0,023 | 0,0184 | 0,0184 | 0,02 | 0,016 | 0,016 |

4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS

Una vez establecidos los valores de las tasas, se han realizado las simulaciones de los diferentes escenarios para las dos áreas objeto de estudio. Los valores obtenidos para los principales parámetros estimados por el modelo quedan recogidos en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de las simulaciones de demandas de suelo residencial y productivo para los tres escenarios establecidos en las dos áreas de estudio. Los porcentajes de crecimiento en los escenarios se refieren al dato del año 2000

| VARIABLES | TEND | CRISIS | INNOV + SOST | % CRECIM TEND | % CRECIM CRISIS | % CRECIM INNOV + SOST |
|---------------------|-------------|-------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------------|
| GRANADA | | | | | | |
| DEMANDA RESIDENCIAL | 8.012,22 | 7.141,47 | 7.459,29 | 30 | 16 | 21 |
| DEMANDA PRODUCTIVO | 1.534,3 | 1.294,62 | 1.310,19 | 46 | 24 | 25 |
| VIVIENDAS | 312.786 | 281.580 | 285.140 | 42 | 28 | 30 |
| HOGARES | 212.334 | 209.796 | 209.796 | 43 | 42 | 42 |
| POBLACIÓN | 500.448 | 492.986 | 492.986 | 15 | 13 | 13 |
| MADRID | | | | | | |
| DEMANDA RESIDENCIAL | 84.541,41 | 73.646,97 | 73.744,76 | 50.6 | 31.2 | 31.4 |
| DEMANDA PRODUCTIVO | 31.551,42 | 27.525,97 | 25.031,41 | 122.3 | 93.9 | 76.1 |
| VIVIENDAS | 3.713.543 | 3.430.304 | 3.435.618 | 49.9 | 38.4 | 38.6 |
| HOGARES | 2.824.074,5 | 2.791.850,2 | 39.086,3 | 50.7 | 49.0 | 49.0 |
| POBLACIÓN | 6.253.936,9 | 6.155.330,5 | 6.155.330,5 | 15.3 | 13.5 | 13.5 |

De forma gráfica y para los resultados referentes a las demandas de suelo productivo y residencial, las figuras 10 y 11 muestran las diferencias observadas entre los tres escenarios futuros, tanto para Madrid como para Granada.

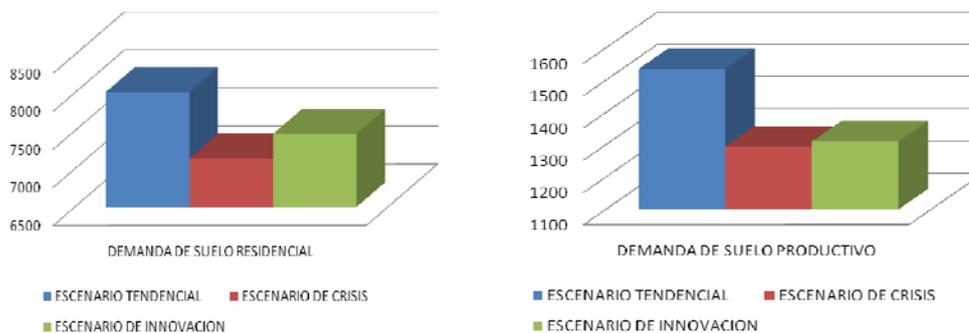


Figura 10. Demandas de suelo residencial (izquierda) y productivo (derecha) para la Aglomeración Urbana de Granada

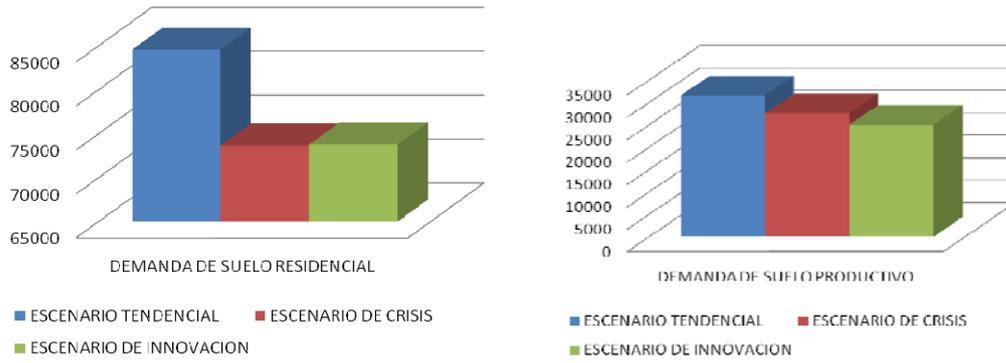


Figura 11. Demandas de suelo residencial (izquierda) y productivo (derecha) para la región urbana de Madrid

Igualmente también pueden ser representadas de forma gráfica la evolución de estas demandas a lo largo de los 20 años de horizonte de los escenarios establecidos. En la figura 12 quedan recogidos estos valores de demanda residencial para las dos zonas de estudio.

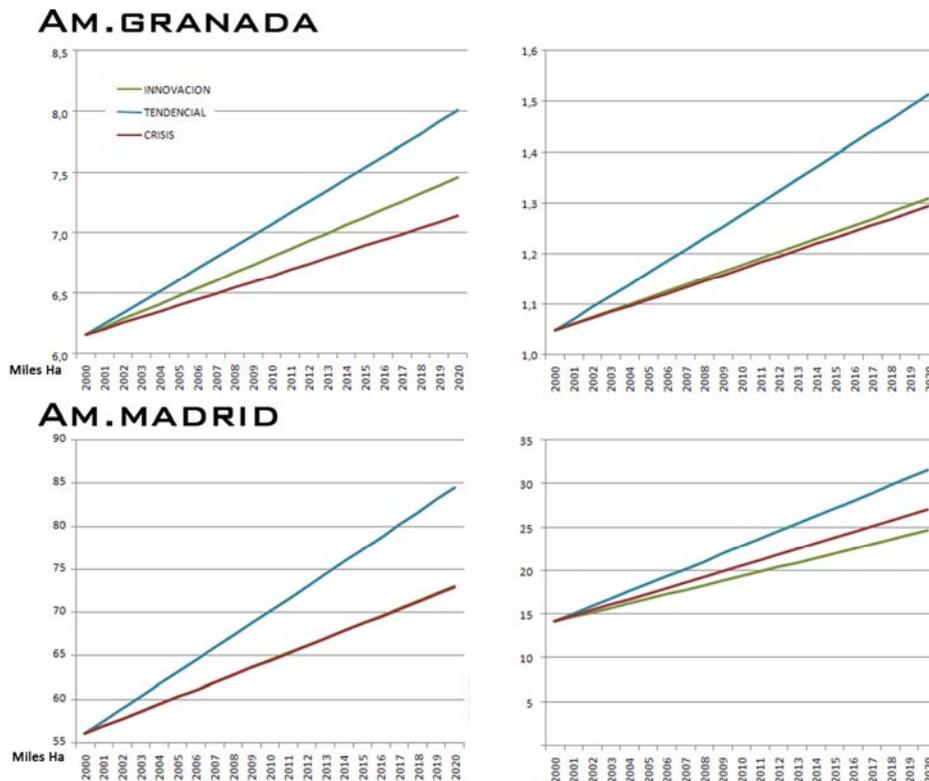


Figura 12. Evolución temporal de la superficie residencial (izquierda) y productiva (derecha) en los tres escenarios para las dos áreas de estudio

Se puede observar para el caso de Granada como las diferencias en los cambios en las demandas son más acusadas en el caso del suelo residencial, especialmente entre los

escenarios de innovación y de crisis, aunque el escenario de tendencia muestra en el caso del suelo productivo una mayor diferencia con respecto a los demás. Queda de manifiesto la disminución de las demandas que suponen tanto el escenario de crisis (valores mínimos de las demandas de los usos residenciales y productivos), así como el escenario de innovación y sostenibilidad.

Por su parte, en el caso de Madrid la disminución de las demandas es similar a lo comentado para el caso de Granada en lo que a las diferencias con el escenario de tendencia se refiere. Sin embargo, para el suelo productivo los valores de demanda son muy similares para los escenarios de crisis y de innovación y sostenibilidad. Por su parte, en el caso del suelo productivo es este último escenario el que presenta los valores más bajos, al contrario que para el caso de Granada. De acuerdo con la descripción del escenario de innovación y sostenibilidad, debería ser el escenario de crisis el que menor crecimiento de suelo productivo presentase, dado que en el escenario de innovación los crecimientos productivos cobran más relevancia que los residenciales. La revisión del proceso de calibración, y de la definición de los cambios introducidos en cada escenario podrían ayudar a comprender mejor el comportamiento de las demandas en este último caso.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El diseño de un modelo sencillo, aplicable en entornos metropolitanos que permita la estimación de demandas de suelo urbano en el contexto de diferentes escenarios futuros; y que además lo haga a partir de información fácilmente accesible, constituye el principal objetivo inmediato de este trabajo. Para ello se han empleado dos laboratorios metropolitanos como son la Región Urbana de Madrid y la Aglomeración Urbana de Granada.

En este sentido, y a la vista de los resultados mostrados, se puede concluir que el modelo, de una forma muy sencilla, reproduce el comportamiento para el período comprendido entre los años 1990 y 2000, y que posteriormente simula unos resultados claramente diferenciados para los tres escenarios establecidos, tanto a nivel de demandas residenciales como productivas, en las dos áreas de estudio. Se muestra así como una herramienta exploratoria útil para complementar el diseño de los escenarios, ya de por sí interesante para su aplicación en la planificación metropolitana.

No obstante, las limitaciones del modelo son amplias, derivadas en un primer lugar de la falta de una fecha adicional para la validación de los resultados; o de la falta de ciertos factores con una relación evidente, como podrían ser todos aquellos aspectos relacionados con el planeamiento.

Otro objetivo final del trabajo, y del proyecto de investigación en el que se enmarca el planteamiento de los modelos y escenarios (Proyecto SIMURBAN) es la inclusión de nuevos instrumentos facilitadores de las decisiones en el planeamiento, y el incremento de la capacidad de adaptación y respuesta de los planes. En este contexto, el diseño y planteamiento de escenarios futuros, en este caso escenarios exploratorios externos, unido a la obtención de diversos “perfiles” de demandas de ocupación de suelo, podría constituir un instrumento útil para la ayuda en la toma de decisiones metropolitanas, y ser incorporado, con mayor o menor grado de adaptación, en los instrumentos de planeamiento, como posible avance hacia planes más flexibles o adaptables a la realidad (Soria *et al.*, 2009) que hacen más operativo el actual “Plan Ley”. No en vano, un claro ejemplo de ello queda patente en las previsiones de calificación de suelo llevadas a cabo en múltiples planes (territoriales y sobre todo municipales) redactados y aprobados recientemente, que sin embargo hoy día resultan ciertamente inadecuadas en el contexto económico actual. En este sentido y de forma práctica, la disposición de diversos escenarios de demanda podría, por ejemplo, establecer diferentes etapas sucesivas de calificación y ocupación de suelo en los planes, que se irían activando a medida que la situación real se dirige hacia uno u otro escenario, y se cumplen los objetivos del plan, que podrían ser monitorizados igualmente.

Finalmente, el último de los objetivos del trabajo está en relación con la integración de estas demandas futuras, generadas a través de la Dinámica de Sistemas, con modelos de simulación y/o localización espacial basados en SIG y EMC, Autómatas Celulares, etc.; permitiéndose así una integración del factor tiempo en estos últimos. A este respecto consideramos que los resultados de este trabajo, unidos a las simulaciones espaciales, podrían ayudar a localizar espacialmente las características territoriales de estos escenarios y a evaluar sus consecuencias (ya sean positivas o negativas) sobre la accesibilidad, el riesgo, el paisaje, etc., que podrían facilitar la disminución de la incertidumbre en la toma de decisiones (Faludi y Van der Valk, 1994; Prato, 2007;

Carsjens, 2009), y por tanto una mejora de las condiciones decisorias en las que los procesos de planeamiento tienen lugar.

6. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto SIMURBAN del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC España) a través de la convocatoria de 2006 de proyectos del Plan nacional de Investigación científica, Desarrollo e Innovación 2004-2007, Programa nacional de Ciencias Sociales, Económicas y Jurídicas (Referencia SEJ2007-66608-C04-00/GEOG).

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, F. (2008): Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la Aglomeración Urbana de Granada. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.

Aracil, J. y Gordillo, F. (1997): Dinámica de Sistemas. Alianza Universidad Textos. Madrid.

Barredo Cano, J. I y Gómez Delgado, M. (2008): "Toward a set of IPCC SRES urban land use scenarios: modelling urban land use in the Madrid region". En Paegelow, M and Camacho, M.T (Eds) Modelling Environmental Dynamics. Springer-Verlag. Berlín.

Borjerson, L., Hojer, M., Dreborg, K. H., Ekvall, T. y Finnveden, G. (2006): "Scenario types and techniques: Towards a user's guide", *Futures*, 38, pp. 723-739.

Carsjens, G. J. (2009): Supporting Strategic Spatial Planning. Planning Support Systems for the spatial planning of metropolitan landscapes. Tesis Doctoral, Universidad de Wageningen.

Cheng, J. y Masser, I. (2003): "Urban growth pattern modelling: a case study of Wuhan city, PR China", *Landscape and Urban Planning*, 62, 199-217.

Consejería de Obras Públicas y Transportes (1999): Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Granada. Junta de Andalucía.

De Miguel, R. (2008): "Planificación territorial, gobierno y gobernanza metropolitana en las grandes ciudades españolas", *Boletín de la AGE*, 48, pp. 355-374.

De Santiago Rodríguez, E. (2007): "Madrid, ciudad única. Pautas y lógicas espaciales recientes en la región madrileña", *Urban*, 12, pp. 8-33.

Dreborg, K. H. (2004): Scenarios and structural uncertainty: explorations in the field of sustainable transport. Tesis doctoral. Real Instituto Tecnológico de Estocolmo.

European Environment Agency (2006): Urban Sprawl in Europe. EEA Report No. 10.

- ESPON Project 3.2 (2006): Spatial scenarios and orientations in relation to the ESDP and Cohesion policy. Final Report. European Spatial Planning Observation Network, Bruselas.
- Faludi, A. y Van der Valk, A. (1994): Rule and order. Dutch planning doctrine in the Twentieth century. Kluwer Academic Publishers.
- Feria, J. M. (2004): "Problemas de definición de las áreas metropolitanas en España". *Boletín de la AGE*, 38, pp. 85-99.
- Fernández, D. (2004): "Bases para la evaluación ambiental y territorial del Área Metropolitana de Granada". *Congreso Nacional de Medio Ambiente*. Colegio Nacional de Físicos. Madrid.
- Forrester, J. (1969): Urban Dynamics, Productivity Pres. Portland.
- Goded, M. (2000): La caja de herramientas de la prospectiva estratégica. Cuadernos de LIPS.
- Gómez Delgado, M. y Barredo J. I. (2005): Sistemas De Información Geográfica y Evaluación Multicriterio En La Ordenación Del Territorio. Ed. Ra-Ma, Madrid.
- Guhathakurta, S. (2001). "Urban Modelling as Story telling: Using Simulation Models as a Narrative", Centre for Advanced Spatial Analysis Working Paper No. 37, ISSN: 1467-1298.
- Gutiérrez Puebla, J. (2004). "Producción de suelo industrial en la Comunidad de Madrid". *Anales de Geografía*, 24, 169-192.
- Hendriks, P. y Vriens, D. (2000): "From Geographical Information Systems to Spatial Group Decision Support Systems. A Complex Itinerary", *Geographical and Environmental Modelling*, 4 (1), pp. 83-104.
- INE (Instituto nacional de Estadística) (2008). Padrón de habitantes 2008. www.ine.es.
- JRC (Joint Research Centre) (2007): PRELUDE PROJECT. <http://www.eea.europa.eu/multimedia/interactive/prelude-scenarios/> [Junio 2009].
- Lopez Klocker, C. y Bosque Sendra, J, (2005): "SIG y Dinámica de sistemas", X *Conferencia Iberoamericana de SIG*, San Juan de Puerto Rico, septiembre de 2005, 10 p.
- López de Lucio, R. (2003): "Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid", *Urban*, 8, pp. 124-161.
- Menor, J. (2000): La Vega de Granada: transformaciones agrarias recientes en un espacio periurbano. Ed Universidad de Granada, Granada.
- Ministerio de Vivienda (2006): Atlas Estadístico de las Áreas Urbanas en España 2004. Ministerio de Vivienda. Madrid.
-

- Nijkamp, P., y Blaas, E. (1994): *Input Assessment and Evaluation in Transportation Planning*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Luca, C. (2007): “Generative platform for urban and regional design”, *Automation in Construction*, 16, pp. 70–77.
- OSE (2006): *Informe de la Sostenibilidad en España 2006*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Ott, T. y Swiaczny, F. (2001): *Time-Integrative geographic information systems. Management and analysis of spatio-temporal data*. Springer-Verlag, Berlin.
- Peterson, G. D., Cumming, G. S. y Carpenter, S. R. (2003): Scenario Planning: a tool for conservation in a uncertain world. *Conservation biology*, 17 (2), pp. 358-366.
- Pettit, C. y Pullar, D. (2004): “A way forward for land use planning to achieve policy goals by using spatial modeling scenarios”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31, pp. 213-233.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, 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. XII, núm. 293. <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-293.htm> [Diciembre 2009].
- Prato, T. (2007): “Evaluating land use plans under uncertainty”. *Land Use Policy*, 24, pp. 165–174.
- Ravetz, J. (2009): *Agenda for Integration with Peri-urban land-use relationships*. PLUREL MEETING.
- Soria, J. A., Valenzuela, L. M. y Aguilera, F. (2009): “The incidence of planning in the growth and change of the Metropolitan Area of Granada”, *City Futures*. Madrid, Junio 2009.
- Stillwell, J. S. Geertmaan, S. y Openshaw, S. (eds) (1999): *Developments in geographical information and planning*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Valenzuela, L. M., Aguilera, F., Soria, J. A. y Molero, E. (2008): “Designing and assessing of development scenarios for metropolitan patterns”. En Paegelow, M. y Camacho, M.T (eds.): *Modelling Environmental Dynamics*. Springer .
- Verburg, P. H., Schot, P., Dijst, M., y Veldkamp, A. (2004): “Land use change modelling: current practice and research priorities”. *Geojournal*, 61 (4), pp. 309-324.

Anexo 5

Herramienta para la asignación óptima de usos del suelo

Publicación:

Rodríguez Álvarez, Y., **Plata Rocha, W.**, Salado García, M. J., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2009). “Herramienta para la asignación óptima de usos del suelo”, *II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad*, pp. 1-13, Dsignum Estudi Gràfic, Barcelona, España.

RESUMEN

En la actualidad existe una creciente necesidad de desarrollar herramientas informáticas que apoyen los procesos de planificación y toma de decisiones a nivel territorial. En este sentido se presenta el diseño e implementación de **BuildSceneries**, un módulo para la asignación de usos del suelo mediante técnicas de Evaluación Multicriterio, concretamente la Sumatoria Lineal Ponderada y el Método Conjuntivo.

Este módulo se desarrolla en el ambiente de API (*Applications Programming Interface*) del Sistema de Información Geográfica (SIG) IDRISI y utilizando el lenguaje de programación C#.

Para probar dicha herramienta, se hace una simulación de un escenario de asignación de suelo residencial, comercial e industrial para la Comunidad de Madrid, tomando en consideración algunos principios de sostenibilidad del territorio.

Palabras clave: Planificación, Toma de Decisiones, SIG, EMC, Simulación, Escenarios, Crecimiento urbano.

ABSTRACT

There is an increasing need to develop tools to support planning and decision making at territorial level. Thus, we present the design and implementation of **BuildSceneries**, a module for allocation land uses trough Multicriteria Evaluation techniques, specifically Weighted Linear Combination and Conjunctive Method.

This module is developed in the environment of API (*Applications Programming Interface*) of the Geographic Information System (GIS) IDRISI and using the C # programming language.

The tool was tested with the simulation of a scenario for residential, commercial and industrial land use in the Community of Madrid, taking into account some principles of sustainability planning.

Keywords: Planning, Decision Making, GIS, MCE, Simulation, Scenarios, Urban Growth.

1. INTRODUCCION

Existe actualmente una creciente necesidad de desarrollar herramientas de simulación de cambios y asignación de usos del suelo que apoyen los procesos de toma de decisión y planificación territorial. Asimismo, se ha venido incrementando la aplicación de diferentes metodologías de análisis espacial, útiles en la simulación de escenarios de uso del suelo y, en particular, en la simulación del crecimiento urbano.

En este sentido, la simulación de escenarios futuros se ha efectuado aplicando modelos basados en autómatas celulares^{1, 4, 6, 19, 20}, metodologías basadas en modelos de demanda y sobreposición de mapas de proximidad¹⁷ y modelos de regresión logística espacial¹⁸.

Asimismo, existen trabajos en los cuales se aplican técnicas de evaluación multicriterio para la evaluación de la aptitud o capacidad de territorio para acoger nuevas urbanizaciones y grandes áreas industriales y comerciales^{2, 3, 8, 9, 13, 10, 11, 15, 21}.

Para la modelación o simulación, es común utilizar Sistemas de Información Geográfica. Entre estos programas cabe destacar el SIG IDRISI, que cuenta con un conjunto de herramientas de apoyo a la toma de decisiones multicriterio y multiobjetivo. También en las últimas versiones de *ArcGIS* se ha implementado un módulo de EMC, en concreto la técnica de análisis denominada Sumatoria Lineal Ponderada (*Weighted Sum*). Del mismo modo, el *software* ILWIS cuenta con el módulo *Spatial Multi-Criteria Evaluation* para la toma de decisiones¹².

Además, algunos investigadores han desarrollado herramientas específicas implementando algunos métodos de evaluación multicriterio. En esta línea se encuentra el trabajo desarrollado por Marinoni¹⁶; este autor diseñó un macro en Visual Basic para *ArcGIS* que permite al usuario obtener los pesos de los criterios aplicando el proceso de jerarquías analíticas y la posterior asignación de uso del suelo por medio de una sumatoria lineal ponderada. Del mismo modo, Malczewski y otros¹⁴, implementaron en el ambiente de ArcView 3.2 un módulo de evaluación multicriterio borroso, específicamente la sumatoria lineal ponderada ordenada GIS-OWA. Asimismo, Boroushake y Malczewski⁵ extienden el trabajo de Marinoni¹⁶ y toman en cuenta la sugerencia de Yager y Kelman²² para mejorar la capacidad del método *AHP* (*Analytical Hierarchy Process*) convencional mediante la integración de operadores lingüísticos

borrosos. Bajo este concepto dichos investigadores adaptaron el procedimiento AHP-OWA como un módulo adicional en el entorno de ArcGIS.

En resumen, si bien parece que existen herramientas idóneas para la simulación de escenarios, es posible decir que éstas aún presentan carencias en su aplicación. A nuestro juicio, entre las más relevantes se podría mencionar el que la mayoría de las aplicaciones revisadas trabajan de forma mono-objetivo; es cierto que IDRISI cuenta con el módulo MOLA (*MultiObjective Land Allocation*), que, en principio, es para llevar a cabo una asignación multiobjetivo, aunque previamente es necesario obtener los mapas de entrada en dicho módulo por medio de un análisis mono-objetivo; además, en la asignación multiobjetivo final dicho módulo arroja patrones espaciales dispersos y disjuntos, debido, principalmente, a la naturaleza espacial de las celdas y la falta explícita de objetivos y limitaciones espaciales^{7, 10}. Además, algunas de las herramientas mencionadas anteriormente no son fáciles de implementar cuando se tiene una cantidad considerable de factores, en particular las técnicas borrosas.

Ante este panorama, surge la necesidad de diseñar una herramienta práctica y fácil de usar, que mejore las deficiencias planteadas en la simulación de modelos de usos del suelo. Por ello, este trabajo tiene como **objetivo principal** diseñar un módulo que auxilie en la simulación de escenarios de uso del suelo, utilizando técnicas de EMC en un ambiente multiobjetivo.

2. PLANTEAMIENTO DE LAS TÉCNICAS DE EMC UTILIZADAS

La primera de las técnicas de EMC que se desean implementar es la *sumatoria lineal ponderada*. Se trata de una técnica de las denominadas compensatorias, en las que los valores bajos alcanzados por una alternativa en un determinado factor, pueden ser compensados por los valores altos alcanzados por esa misma alternativa en otro factor. Para ello, se parte del hecho de que los usuarios introducirán como datos iniciales los factores y sus pesos, así como las restricciones. A partir de aquí, el procedimiento seguido será realizar una sumatoria lineal ponderada entre los valores de los pesos y los factores y así obtener un mapa de aptitud. No obstante, el módulo tendrá la opción de trabajar con más de un objetivo a la vez (multiobjetivo). En principio el análisis se basa en la siguiente ecuación:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot v_{ij}$$

Donde: r_i es el nivel de aptitud del píxel i ; w_j es el peso del factor j ; y v_{ij} es el valor normalizado (0-255) del píxel i en el factor j .

El módulo presenta además la opción de trabajar con un método no compensatorio, concretamente el **conjuntivo**. En él sólo se requiere que el tomador de decisión especifique un umbral como valor mínimo (o máximo) aceptable para cada factor. Si una alternativa no alcanza ese umbral, será eliminada, no permitiendo que los valores alcanzados en otros factores actúen de modo compensatorio. El procedimiento para obtener el mapa final de uso del suelo se da por medio de la superposición de n mapas usando la operación de multiplicación (operador lógico AND) para obtener un nuevo mapa de 0 y 1, el cual indica las alternativas que cumplieron con los umbrales requeridos para todos los factores (píxeles con valor de 1).

No se debe confundir esta eliminación por pasos de las alternativas, con las restricciones estrictamente dichas que se pueden utilizar en cualquier técnica (incluida la sumatoria lineal ponderada). En una EMC, una restricción se presenta como aquellas coberturas de uso del suelo que no pueden ser utilizadas para la asignación de una determinada actividad o uso; ejemplos de ello pueden ser los embalses, las zonas ya urbanizadas, las carreteras, etc.

Como hemos mencionado anteriormente, el propósito de este trabajo es diseñar un módulo para la elaboración de escenarios de simulación de uso del suelo, utilizando técnicas de EMC **en un ambiente multiobjetivo**. Para completar satisfactoriamente esta última parte del objetivo, creemos necesario incluir también en el módulo desarrollado el llamado **Procedimiento de Parcelación por Intervalos** (PPI), como una alternativa para la definición de parcelas que cumplan un área mínima y clasificadas en función de su nivel medio de adecuación⁷, lo cual sería una aportación en los módulos de EMC.

Dada la ejecución iterativa (para 1 hasta n objetivos) del Procedimiento de Parcelación por Intervalos, utilizar esta metodología para generar escenarios futuros de uso del suelo en un entorno multiobjetivo puede resultar un proceso complejo y largo, dependiendo del número de objetivos que se desee conseguir. No obstante, es posible resolver este

tipo de problemas mediante una herramienta que automatice procesos repetitivos que requieran una parametrización previa, permitiendo al usuario definir en un momento dado todos los elementos y operaciones que se llevarán a cabo durante el proceso. Asimismo, la solución computacional debe ser capaz de almacenar distintos estados durante el proceso, de manera que el usuario pueda cargar parámetros establecidos con anterioridad y ejecutar las operaciones asociadas a éstos.

Por último, una vez obtenidos los mapas en parcelas de adecuación para los objetivos definidos, se hace la simulación del escenario final de uso del suelo utilizando una técnica de asignación multiobjetivo (*MultiObjective Land Allocation*, MOLA). Estos últimos procedimientos se implementaran en la opción **Simulación de Escenarios**.

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

La herramienta de simulación de escenarios presenta una interface gráfica cómoda y agradable, mostrándose como un asistente en el que se solicitan al usuario, paso a paso, los datos necesarios para la ejecución de los procesos que culminan con la generación de un mapa de uso del suelo multiobjetivo.

Como hemos apuntado ya, el sistema utiliza dos técnicas de EMC, la sumatoria lineal ponderada y el método conjuntivo; no obstante, para la generación de los escenarios se conforma una metodología que combina ambos métodos, así como **PPI** y **MOLA**.

El programa consta de un modelo de clases y varias estructuras de datos, específicamente listas genéricas, que permiten parametrizar y almacenar en memoria las operaciones que se ejecutan a través del API de IDRISI, incluyendo las definidas en el Procedimiento de Parcelación por Intervalos implementado. Para este caso, se dividieron las operaciones en secuencias, de manera que el usuario pueda obtener unos mapas preliminares (mapas de aptitud y mapas en parcelas) que le permitan tomar decisiones que garanticen una buena parametrización de las operaciones incluidas en el modelo, como pueden ser: la reclasificación de los mapas de aptitud, la asignación del tamaño mínimo y máximo de las parcelas, la superficie de los usos del suelo modelados, etc. En este sentido, la *interface* gráfica proporciona al usuario toda la información necesaria para configurar su modelo paso a paso.

En la creación del módulo se utilizó C Sharp como lenguaje de programación, y como entorno de desarrollo SharpDevelop 3, un entorno de código abierto para la tecnología .NET de Microsoft.

El proceso de generación de escenarios de uso futuro del suelo, a partir de los métodos mencionados y teniendo como soporte adicional las operaciones descritas, pasa por las siguientes etapas:

Evaluación multicriterio – monoobjetivo

- Selección del método a emplear, definición de los objetivos (usos del suelo) a modelar y ubicación del directorio de trabajo.
- Definición de los criterios a modelar (restricciones y factores).
- Asignación de pesos a los factores y selección de las restricciones, ambos procesos para cada objetivo.

Hasta aquí el módulo obtiene los mapas de aptitud por objetivo; el siguiente paso será obtener los mapas en parcelas de adecuación media: evaluación multiobjetivo

- Asignación de los valores de reclasificación a los mapas de aptitud para cada objetivo y los valores mínimos y máximos que tendrán las parcelas.
- Finalmente, asignación multiobjetivo, obteniendo así el escenario final de usos del suelo.

Para modelar cada una de estas etapas y operaciones que se ejecutan, se construyó un modelo de clases que permitió modelar de manera abstracta cada elemento del modelo (Figura 1). Así, se definió una clase abstracta, con propiedades y métodos virtuales que definen el comportamiento genérico de una operación equivalente en el modelo de objetos de IDRISI. Derivadas de ésta, y aprovechando la capacidad de herencia del lenguaje usado, se crearon clases específicas que modelan el comportamiento de cada operación, definiendo en cada una, las propiedades y métodos específicos de la operación, en correspondencia con su equivalente en IDRISI. Adicionalmente, se crearon estructuras de datos (tipos estructurados) para modelar los componentes del modelo (objetivos, restricciones y factores) (Figura 2). Asimismo, se crearon un

conjunto de listas genéricas que agrupan por una parte los componentes del modelo y por otra las operaciones que se ejecutarán sobre ellos. Esto permitió en un momento del diseño modelar la manera en que ocurren estos procesos en la realidad usando el sistema IDRISI.

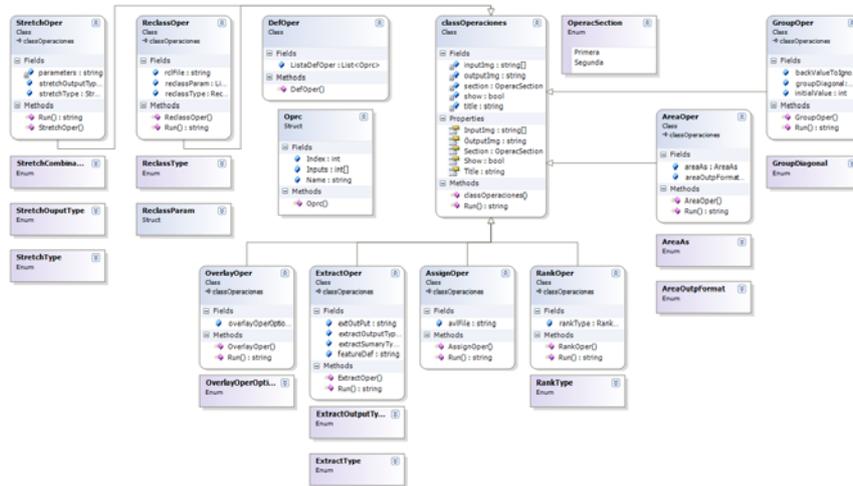


Figura 1. Diagrama de clases “Operaciones” de BuildSceneries

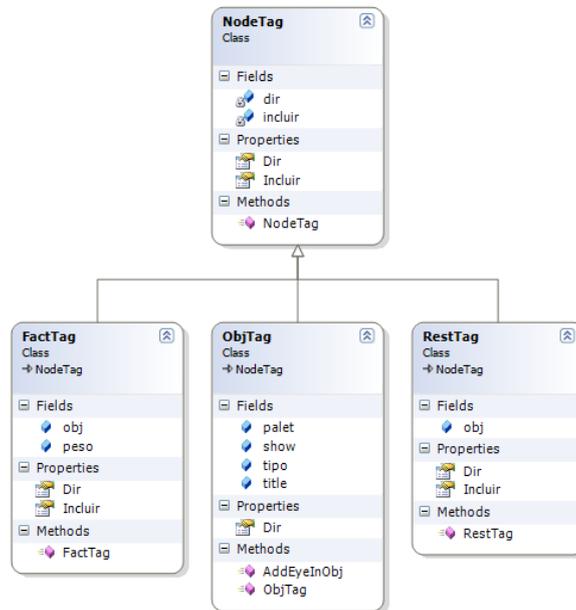


Figura 2. Diagrama de clases “Componentes del modelo” de BuildSceneries

4. APLICACIÓN DEL MODULO A UN CASO DE ESTUDIO

Para probar la herramienta diseñada, se realizó la simulación de un escenario para la Comunidad de Madrid, tomando como base el año 2000 y como horizonte futuro el año 2020. En dicho escenario se consideran factores de distinta índole, intentando modelar un crecimiento urbano más acorde con la conservación de recursos naturales clave como

el suelo o el agua, eficiente desde el punto de vista económico e incluso desde el punto de vista social (Tabla 1). Asimismo, se cuenta con restricciones como: zonas urbanas, carreteras, cuerpos de agua, etc. existentes en el año 2000.

No es el objetivo de este trabajo explicar cómo fueron diseñados cada uno de los factores, sino comprobar que la herramienta pueda llevar a cabo la simulación de escenarios de uso del suelo. Por tal motivo se obviará la descripción de cada uno de los factores.

En este caso en particular se modelaron tres objetivos: suelo urbano, comercial e industrial. Por su parte, la demanda de suelo requerida en la simulación se obtuvo por medio de un modelo de dinámica de sistemas², donde se considera que para este escenario las metas de superficie al año 2020 son: 17.617,5 hectáreas para uso residencial, y 10.835,7 hectáreas para uso productivo; éste se dividió en dos para obtener la superficie de las zonas comerciales e industriales, quedando 5.417,85 para uso comercial y 5.417,85 para uso industrial.

Tabla 1. Factores utilizados en la simulación del escenario

| Factores | Ponderaciones de los factores | | |
|---|-------------------------------|-----------|------------|
| | Urbano | Comercial | Industrial |
| F1. Uso del suelo | 0,16 | 0,16 | 0,29 |
| F2. Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos | 0,04 | 0,03 | 0,06 |
| F3. Tipos de Suelo | 0,06 | 0,06 | 0,12 |
| F4. Pendiente | 0,05 | 0,04 | 0,04 |
| F5. Accesibilidad a carreteras | 0,14 | 0,16 | 0,14 |
| F6. Accesibilidad a zonas urbanas | 0,18 | 0,17 | 0,12 |
| F7. Accesibilidad a comercios | 0,08 | 0,15 | - |
| F8. Accesibilidad a industrias | 0,05 | - | 0,09 |
| F9. Geotecnia | 0,06 | 0,06 | 0,04 |
| F10. Accesibilidad a hospitales | 0,10 | 0,06 | - |
| F11. Distancia (ponderada) a la población | - | 0,11 | 0,10 |
| F12. Orientación del terreno | 0,08 | - | - |

Con estos datos, se selecciona, en primer lugar, el método a utilizar, el directorio de trabajo y los objetivos a modelar (Figura 3). Posteriormente, se continúa a la siguiente pantalla donde se deben seleccionar las restricciones (Figura 4) para, seguidamente, en la siguiente pantalla, seleccionar los factores que se definirán en el modelo (Figura 5).



Figura 3. Primer paso. Selección del método y definición de objetivos

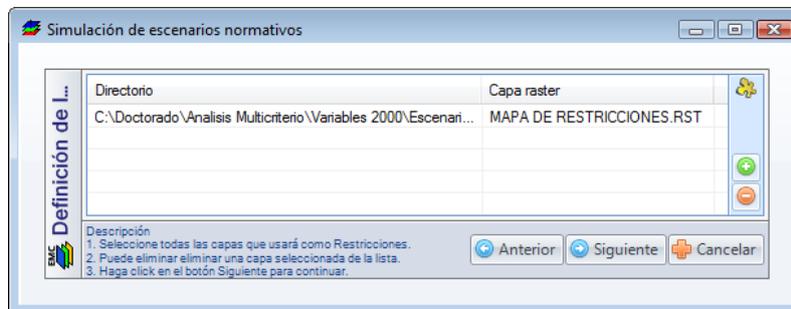


Figura 4. Paso Segundo. Definición de Restricciones

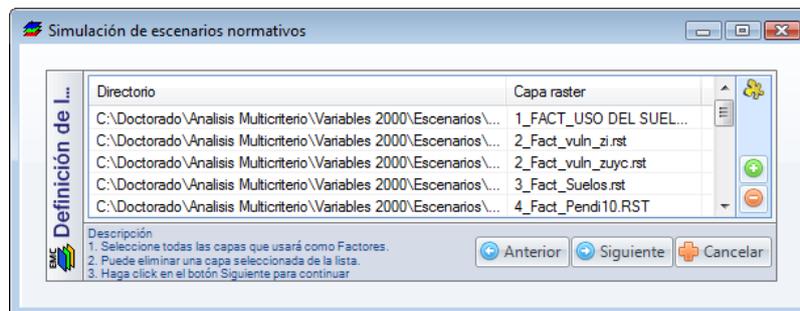


Figura 5. Paso Tercero. Definición de Factores

Una vez seleccionados los criterios, se deberán asignar los pesos a los factores y definir las restricciones para cada objetivo (Figura 6); con estos se obtendrán los mapas de aptitud para cada objetivo específico. Adicionalmente, se pueden especificar que capas de salida se desean visualizar y con que paleta de colores. En este punto el módulo empieza con el proceso de elaboración de los mapas de aptitud para cada objetivo.

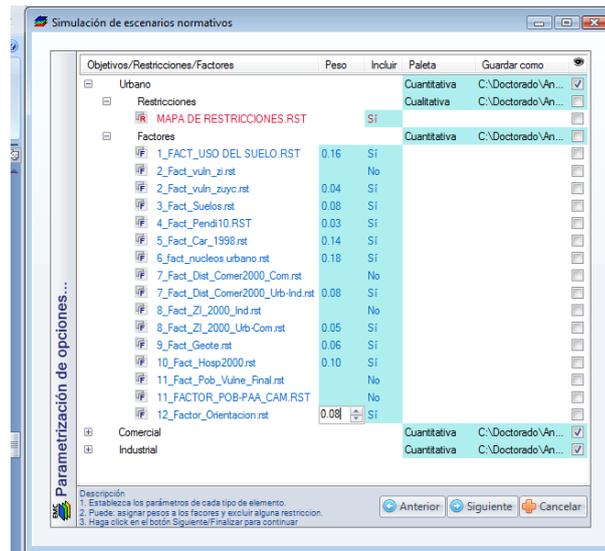


Figura 6. Asignación de pesos a factores y selección de las restricciones para cada objetivo

Una vez obtenidos los mapas de aptitud (Figura 7) se procede a la elaboración de los mapas en parcelas de adecuación, en donde es prioritario asignar un valor de reclasificación a cada mapa de aptitud, así como el mínimo y máximo que deben de tener las parcelas (Figura 8).

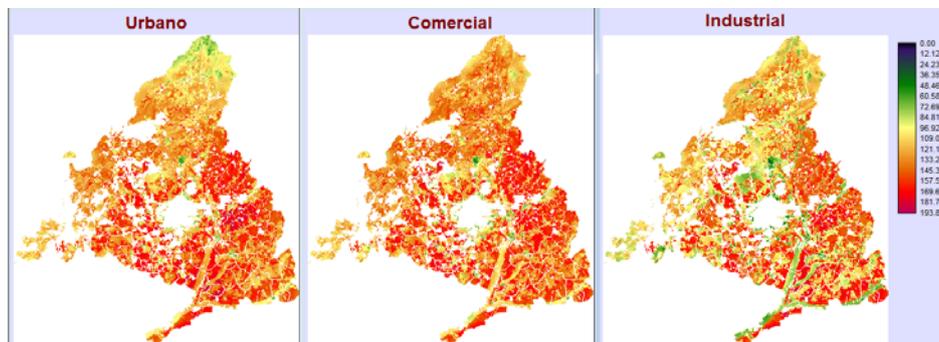


Figura 7. Mapas de aptitud

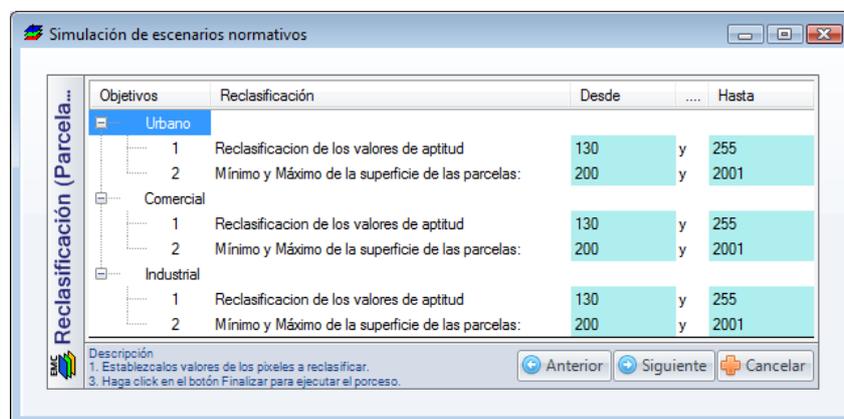


Figura 8. Mapas en parcelas de adecuación media

Este proceso puede ser iterativo, ya que si con los valores de reclasificación asignados se obtienen mapas en parcelas de adecuación media (Figura 9) que no superan las metas de superficie por objetivo, será necesario volver a reclasificar con valores más bajos dichos mapas.

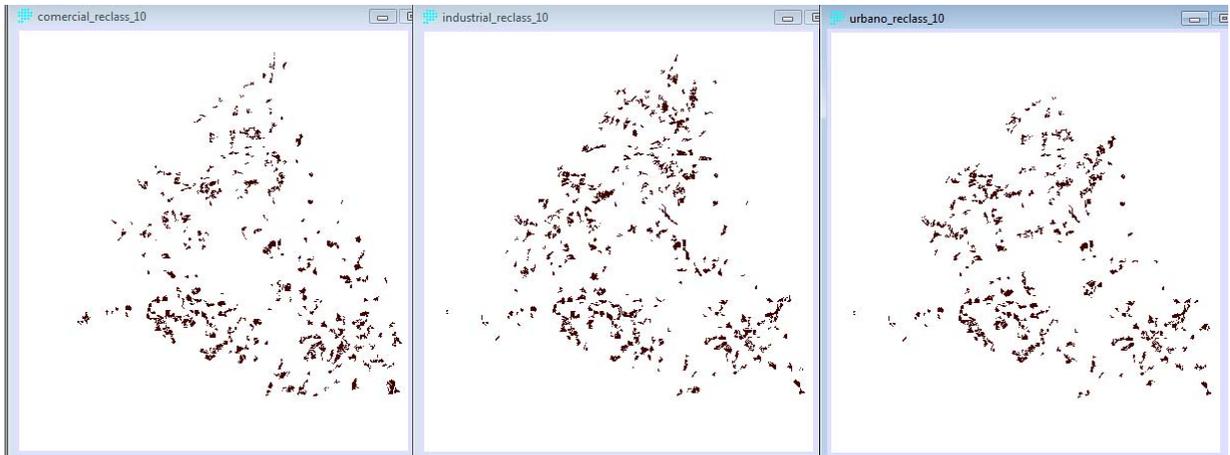


Figura 9. Mapas en parcelas de adecuación media

Posteriormente, se procede a la asignación multiobjetivo de los mapas de parcelas para los objetivos que se tengan contemplados. Este paso se completa utilizando el módulo MOLA de IDRISI, en donde se pueden definir pesos para cada objetivo, así como la meta de superficie requerida para cada uso del suelo en el horizonte futuro planteado (Figura 10). Finalmente, se obtiene el escenario de uso del suelo multiobjetivo (Figura 11), en el que se aprecia un patrón relativamente compacto de las manchas resultantes, evitando uno de los problemas ya mencionados de estas metodologías multicriterio en la simulación de escenarios futuros de ocupación del suelo.

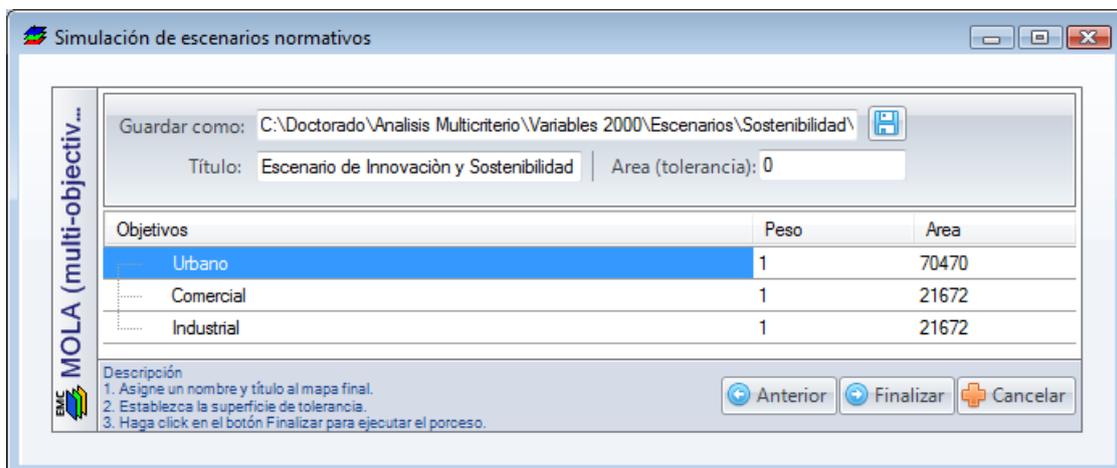


Figura 10. Asignación de pesos y superficies a los objetivos

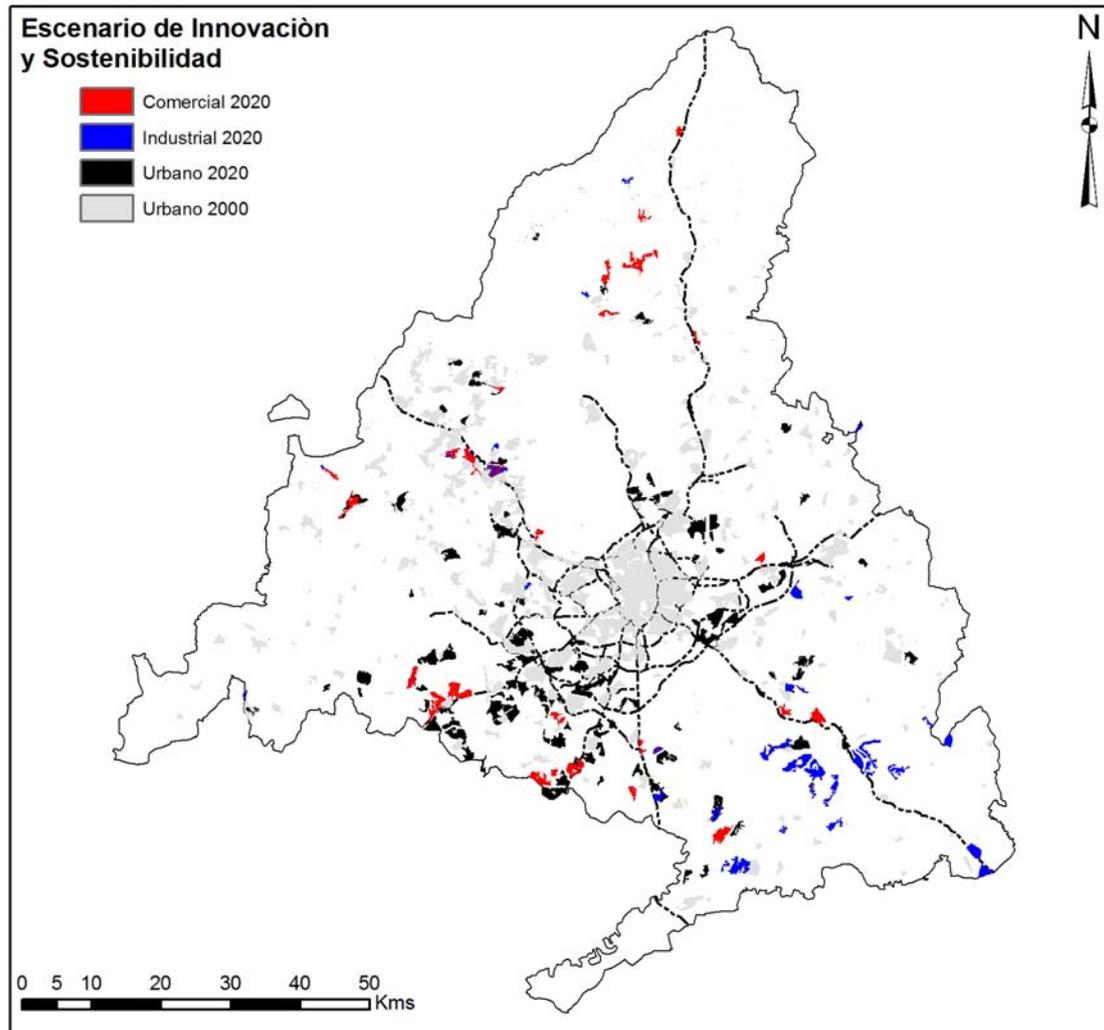


Figura 11. Escenario de uso de suelo Urbano, Comercial e Industrial al año 2020 para la Comunidad de Madrid.

Fuente. Elaboración propia. Datos del CLC 2000. Instituto Geográfico Nacional, España

5. CONCLUSIONES

Como hemos señalado, la implementación del método de parcelación por intervalos (PPI) y la asignación multiobjetivo incorporadas en la herramienta *BuildSceneries* pueden ser de gran utilidad en la simulación/asignación de usos del suelo. En el caso de su aplicación a la Comunidad de Madrid, se ha mostrado cómo la utilización de diferentes técnicas de evaluación multicriterio en la simulación/asignación de usos del suelo, permite que los escenarios se puedan plantear en función de factores continuos y/o factores restrictivos (binarios), lo cual puede proporcionar distintos patrones de usos del suelo en función del escenario que se desee simular.

En este trabajo, el escenario de crecimiento urbano planteado considera algunos factores que creemos deben de ser tomados en cuenta en un modelo de desarrollo urbano sostenible. Así, como se ha señalado en párrafos anteriores, el resultado de la simulación/asignación óptima de los tres usos del suelo proyectados (Figura 11) refleja la utilidad del método de parcelación por intervalos aplicado, que permite la formación de manchas relativamente compactas. Esa compacidad de las nuevas manchas artificiales es uno de los atributos más repetidos en los trabajos sobre sostenibilidad del desarrollo urbano.

Asimismo, el escenario refleja el efecto de los factores seleccionados, de una u otra forma comprometidos con distintos aspectos de la sostenibilidad. De esta manera, las nuevas áreas residenciales son asignadas en las cercanías de los núcleos urbanos de tamaño intermedio (evitando así tanto la ineficaz dispersión como la excesiva concentración), cercanos a las carreteras y en usos del suelo de baja productividad. Por su parte, las nuevas zonas industriales están localizadas en lugares próximos a carreteras y en zonas de escasa densidad de población. Del mismo modo, las zonas comerciales resultan distribuidas en lugares cercanos a las nuevas zonas urbanas y a distancias considerables entre ellas, para maximizar el área de captación de potenciales usuarios.

Para finalizar, queremos destacar que la herramienta implementada aprovecha las conocidas ventajas de las técnicas de evaluación multicriterio en el análisis y la ordenación territorial, al tiempo que soluciona algunos de los problemas habituales en su aplicación. Por otra parte, el lenguaje de programación utilizado ha permitido, a través de un modelo de clases, ejecutar los comandos del API del SIG IDRISI, mejorando su funcionalidad. Por último, la descripción que se hace de la herramienta en el apartado de aplicación, permitirá que usuarios de diferentes áreas del conocimiento puedan simular escenarios y/o asignación de usos del suelo en función de diferentes factores o variables espaciales (el módulo *BuildSceneries* se encuentra disponible de forma gratuita en la página web del Departamento de Geografía de la UAH: http://www.geogra.uah.es/web_simurban/index.php).

6. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación “SIMURBAN: Análisis y simulación prospectiva mediante Tecnologías de la

Información Geográfica (TIG) del crecimiento urbano actual. Evaluación de su sostenibilidad”, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC España) a través de la convocatoria 2006 de proyectos del Plan nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación 2004-2007, Programa nacional de Ciencias Sociales, Económicas y Jurídicas (referencia SEJ2007-66608-C04- 00/ GEOG).

7. REFERENCIAS

- ¹Aguilera Benavente, F., Plata Rocha, W., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M. (2009). “Hacia la simulación de escenarios futuros de demanda de ocupación de suelo en ámbitos metropolitanos”, *II Congreso Internacional de Medida y Modelización de la Sostenibilidad*, Terrassa, España.
- ²Al-Shalabi, M. A., Mansor, S. B., Ahmed, N. B., Shiriff, R. (2006). “GIS based multicriterio approaches to housing site suitability assessment”, *XXIII International FIG Congress, Munich, Germany*. Disponible en: http://www.fig.net/pub/fig2006/papers/ts72/ts72_05_alshalabi_etal%20_0702.pdf (consultado en octubre de 2008).
- ³Barredo Cano, J. I. and Bosque Sendra, J. (1999). “Multicriteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment”, *Geographical Systems*, 5, pp. 313-327.
- ⁴Barredo Cano, J. I. and Gómez Delgado, M. (2008). “Towards a set of IPCC SRES urban land-use scenarios: modelling urban land-use in the Madrid región”, pp. 363- 385, en Paegelow, M. and Camacho Olmedo, M. T. (2008), *Modelling Environmental Dynamics, Advances in Geomatic Solutions, Springer*.
- ⁵Borouhaki, S. and Malczewski, J. (2008). “Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS”, *Computers and Geosciences*, 32, pp. 399-401.
- ⁶de Nijs, T. C. M., de Niet, R., Crommentuijn, L. (2004). “Constructing land-use maps of the Netherlands in 2030”, *Journal of Environmental Management*, 72, 35-42.
- ⁷Franco Maass y Bosque Sendra (1997). “Procedimiento para la obtención de parcelas de adecuación en imágenes raster”, *I Reunión de usuarios Españoles de Idrisi*, Alcalá de Henares, España.

<http://www.sigte.udg.es/idrisi/recursos/secundari/reunion1/inidice.htm>
- ⁸Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2005). *Sistemas de Información Geografía y Evaluación Multicriterio en la ordenación territorial*, 2^{da} Ed., editorial RA-MA, Madrid, España.
- ⁹Jiang, Hong and Eastman, J. Ronald (2000) “Application of fuzzy measures in multicriteria evaluation in GIS”, *International Journal of Geographical Information Science*, 14:2, pp. 173 – 184.
-

-
- ¹⁰Ligmann-Zielinska, Arika, Church, Richard L., Jankowski, Piotr (2008). “Spatial optimization as a generative technique for sustainable multiobjective land-use allocation”, *International Journal of Geographical Information Science*, 22 (6), pp. 601 - 622.
- ¹¹Liu, Y., Lv, X., Qin, X., Guo, H., Yu, Y., Wang, J., Mao, G. (2007). “An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe”, *Landscape and Urban Planning*, 82, pp. 233-246.
- ¹²López Vázquez, V. H., Bosque Sendra, J. y Gómez Delgado, M. (2008). “Flexibilidad de los SIG para asistir a la toma de decisiones espaciales”, XI Coloquio Ibérico de Geografía, Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá, España.
- ¹³Malczewski, J. (2002). “Fuzzy Screening for Land Suitability Analysis”, *Geographical & Environmental Modelling*, 6, (1), pp. 27-39.
- ¹⁴Malczewski, J., Chapman, T., Flegel, C., Walters, D., Shrubsole, D. And Healy, M.A., (2003). “GIS multicriteria evaluation with ordered weighted averaging (OWA): case study of developing watershed management strategies”, *Environment and Planning A*, 35, pp. 1769–1784.
- ¹⁵Malczewski, J. (2006). “Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8, pp. 270-277.
- ¹⁶Marinoni, O. (2004). “Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS”, *Computers & Geosciences*, 30, pp. 637-646.
- ¹⁷Reginster, I. and Rounsevell, M. (2006). “Scenarios of future urban land use in Europe”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 33, pp. 619 – 636.
- ¹⁸Rounsevell, M., Reginster, I., Araùjo, M. B., Carter, T. R., Dendoncker, N., Ewert, f., House, J.I., Kankaanpaa, S., Leemans, R., Metzger, M.J., Schmit, C., Smith, P., Tuck, G. (2006). “ A coherent set of future land use change scenarios for Europe”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114, pp. 57-68.
- ¹⁹Solecki, W.D., Oliveri, C. (2004). “Downscaling climate change scenarios in an urban land use change model”, *Journal of Environmental Management*, 72, pp. 105-115.
- ²⁰Verburg, P. H., Schulp, C. J. E., Witte, N., Veldkamp, A. (2006). “Downscaling of land use change scenarios to assess the dynamics of European Landscapes”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114, pp. 39-56.
- ²¹Wu, F. and Webster, C. J. (1998). “Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25, pp. 103–126.
- ²²Yager, R.R., Kelman, A. (1999). “An extension of the analytical hierarchy process using OWA operators”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 7 (4), pp. 401–417.
-

Capítulo 5

Simulating urban growth scenarios using GIS and Multicriteria Evaluation techniques. Case study: Madrid Region, Spain

Publicación:

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (En Revisión). “Simulating urban growth scenarios using GIS and Multicriteria Evaluation techniques. Case study: Madrid Region, Spain”, *Environment and Planning B*.

RESUMEN

Durante los últimos años el crecimiento urbano se ha producido sin mucho control o planificación, causando impactos sobre los ecosistemas naturales a nivel regional y global. Esta situación ha estimulado la reflexión sobre las actuales políticas de planificación y también el desarrollo de nuevas herramientas y metodologías para la simulación de escenarios territoriales de futuro.

En este sentido, el uso de las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) en conjunción con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha demostrado ser una opción eficaz para la asignación óptima de usos del suelo. Sin embargo, estas técnicas no han sido totalmente exploradas en el campo de la simulación de escenarios. Por esta razón, el objetivo de la presente investigación ha sido la generación de tres escenarios de crecimiento urbano (de tendencia, crisis y de innovación y sostenibilidad), utilizando técnicas de EMC. En estos escenarios se simulan tres usos del suelo (residencial, comercial e industrial) para la Comunidad de Madrid, partiendo de la situación real del uso de suelo del año 2000 y simulando el uso de suelo urbano al año 2020. Para ello, se han tenido en cuenta hasta 14 factores espaciales, que incluyen aspectos ambientales, económicos y sociales.

Los resultados obtenidos muestran que existen algunas discrepancias entre el escenario de tendencia y las políticas Europeas de transporte y medio ambiente. Esta situación tiene un impacto sobre el territorio, y causa daños irreversibles al medio ambiente. El escenario de crisis, en contraste, alivia estas presiones, no por la aplicación de políticas ambientales en los procesos de planificación, si no debido al cambio de modelo metropolitano que conlleva el contexto de crisis. Por último, la innovación ha sido considerada como un motor del desarrollo económico y las buenas prácticas en la planificación, efectos positivos que se ha destacado en el tercer escenario.

Palabras clave: Simulación del crecimiento urbano, desarrollo de escenarios, Sistemas de Información Geográfica, Evaluación Multicriterio, Comunidad de Madrid.

ABSTRACT

Urban expansion during the last few years has occurred without much control or urban planning, causing both regional and global impacts on the natural ecosystems. This situation has spurred reflection on current planning policies and has also stimulated research on new tools and methodologies for the simulation of alternative territorial scenarios for the future.

In this respect, the use of MultiCriteria Evaluation (MCE) techniques within a Geographical Information System (GIS) environment has been proved to be an efficient option for an optimal allocation of land uses. However, those techniques have not been thoroughly explored yet in the field of scenario simulation. For this reason, the objective of the research presented here has been the generation of three scenarios of urban growth (business as usual, crisis, and innovation and sustainability) using MCE techniques. All those three scenarios discriminate between three land uses (residential, commercial and industrial), and they have been developed for the Madrid Region. These scenarios simulate the land use structure for 2020 building on the situation in 2000. In that process, fourteen spatial factors have been considered, which include environmental, economic and social aspects.

The results obtained show that some discrepancies exist between the business as usual scenario (S1) and the European policies for transport and for the environment. This situation has an impact on the territory, and it causes irreversible damages to the environment. The crisis scenario (S2), in contrast, alleviates those pressures, if not because of the application of environmental policies to the planning process, at least because the situation of crisis causes the metropolitan model to change. Finally, innovation has been considered a driver for economic development and good planning practice, the positive effects of which have been highlighted in the third scenario (S3).

Keywords: Simulation of urban growth, scenario development, Geographical Information Systems, MultiCriteria Evaluation, Madrid Region.

1. INTRODUCTION

Very little control has been exercised over urban expansion in recent decades, and little is known about its regional and global impact on different ecosystems. The principle reason for this may be the inefficient regulatory power of the authorities to combat acute land pressure in the region; consequently, it has become necessary to reconsider current planning policies. In this respect, the use of new methodologies and tools for creating spatial simulations of a series of potential alternatives for future land use, within a more participative framework and with a view to providing planners ample quality information on which to base more efficient planning decisions, is crucial. In this context, the simulation of land use change scenarios offers interesting possibilities for anticipating the consequences that specific land intervention decisions could have in the future, thus assisting in the process of urban planning (Barredo et al., 2005, Schwarz, et al., 2010).

Such scenarios have been shown to be of enormous use, and there is now a considerable body of scientific work on simulating future land use in general, and urban growth in particular, on a local, regional and global scale. Examples include projects such as PRELUDE (PRospective Environmental analysis of Land Use Development in Europe), which has developed up to 5 different scenarios for future land use in Europe (EEA, 2007), PLUREL (Peri-urban Land Use Relationships – Strategies and Sustainability Assessment Tools for Urban – Rural Linkages), focusing on the development of crucial new planning strategies and tools for maintaining a sustainable relationship between rural and urban environments (<http://www.plurel.net/>) and TiGrESS (Time-Geographical approaches to Emergence and Sustainable Societies), aimed at applying a spatial-temporal analysis of environmental and land use changes, using various socioeconomic variables, to hydraulic resource planning, simulating urban dynamics and sustainable planning for agriculture and land use (Winder, 2006), in addition to the many studies which have been carried out by researchers at the Joint Research Centre. Examples of these latter include the development of various land occupation scenarios for Lagos, Lisbon, Dublin, Madrid and Dresden-Prague, among others, whether in terms of analysing the different urban growth alternatives, assessing their sustainability or, in some cases, their vulnerability (Barredo et al., 2003, Barredo et al., 2004, Barredo et al., 2005, Barredo and Gómez Delgado, 2008).

Similarly, in a special edition of the *Journal of Agriculture, Ecosystems & Environment* (2006, Vol. 114, Issue 1) and in other scientific journals, a series of studies on land use scenario simulations in the specific context of Europe have been published, including quantitative assessments of the impact of future land use change (Busch, 2006, de Nijs et al., 2004, Rounsevell et al., 2006, Verburg et al., 2006), the potential effects of different environmental policies and the influence of climate change on agriculture and biodiversity (Dockerty et al., 2006, Reidsma et al., 2006, Westhoek et al., 2006), or the vulnerability of ecosystems and rural areas to land use change (Metzger et al., 2006, van Meijl et al., 2006).

Publications specifically addressing the simulation of future urban growth scenarios have also been produced (Barredo et al., 2004, 2003, Barredo and Gomez Delgado, 2008, Pettit, 2002, Reginster and Rounsevell, 2006, Solecki and Oliveri, 2004).

One of the main contributions made by these studies has been the development of new tools for spatial planning which facilitate the assessment, identification and modelling of factors associated with land and urban dynamics. Furthermore, they have provided an alternative means of visualizing different images of the future, and thus it is possible to identify the influence that the different factors used in the studies have on simulation results (Barredo et al., 2005), thus providing the agents involved in policy making with a better understanding of the processes behind land change, and helping them to assess costs, whether environmental or those implied by implementation of sustainable land and urban planning strategies.

The research carried out in this field has applied a generic methodology, adapted according to the land use simulation techniques employed. Such methodology basically comprises three steps: 1) a qualitative description of the scenarios, 2) a calculation of land demand for each scenario, and 3) a spatial simulation of land uses. This approach involves a series of processes on different scales and levels, following a logical sequence and constructing different models in order to transform the qualitative scenario descriptions into a quantitative simulation of land demand and the spatial pattern of land use (Verburg et al., 2006).

The literature review carried out for the present study confirmed that the special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) on emission scenarios

(Nakicenovic and Swart, 2000) has been widely used as a starting point for qualitative land use scenario descriptions on a global or continental scale (Barredo and Gómez Delgado, 2008, de Nijs *et al.*, 2004, Reginster and Rounsevell, 2006, Rounsevell *et al.*, 2006, Solecki and Oliveri, 2004, Verburg *et al.*, 2006). Other researchers, however, have conceptualized scenario evolution hypotheses on the basis of consensus of expert groups involved, for example, Hoogeveen and Ribeiro (2005) in the context of the *PRELUDE* project, Winder (2006) on the *TiGrESS* project, and Aguilera Benavente (2008) and Pettit (2002) in their PhD Thesis.

With respect to the land demand scenarios assessment, in some instances this is partially or completely based on land and urban development plans, macroeconomic models and/or demographic projections, as is the case for the research carried out by Aguilera Benavente (2008), Barredo and Gómez Delgado (2008), Barredo *et al.* (2003, 2004), de Nijs *et al.* (2004), Molero Melgarejo *et al.* (2007), Pettit and Pullar (2004) and Verburg *et al.* (2006). Other researchers, however, have opted to use statistical models, for example correlating urban growth with variables such as population density or GDP (Reginster and Rounsevell, 2006). Similarly, System Dynamics-based models, a pioneering technique in the field of urban system simulation, have been used (Forrester, 1969), and now represent a useful tool for establishing relationships between socioeconomic and demographic variables, on the one hand, and land use dynamics on the other. Some studies have used this as a basis for determining future land demand in scenario simulations (Aguilera Benavente *et al.*, 2009, Guhathakurta, 2001, Han *et al.*, 2009).

Different techniques have been employed for performing quantitative future scenario simulations, such as Cellular Automata (CA) models, Spatial Regression (SR) methods, MultiCriteria Evaluation Techniques (MCE), Neural Networks (NN) and Agent-Based Models (ABM), among others.

Models based on CA have been widely used in recent years, generally employing a probabilistic system determined by factors such as accessibility to urban areas and roads, land use suitability (usually related with the slope), zoning status and the neighbourhood effect measured for the urban land use (Aguilera Benavente, 2008; Barredo and Gómez Delgado, 2008, Barredo *et al.*, 2004, de Nijs *et al.*, 2004, Han *et al.*,

2009, Hoogeveen and Ribeiro, 2005, Solecki and Oliveri, 2004, Verburg et al., 2006, Yeh y Li, 2001). Simulations based on SR (Aguilera Benavente, 2006, Hu and Lo, 2007) have also generally employed these types of factors (accessibility to roads, transport infrastructures and basic services, or slope and orientation of the land and whether the land is classified as an urban or non-urban zone).

MCE models have been applied, although not exploited to their maximum potential, through the use of additional compensatory techniques for generating future urban growth scenarios (Molero Melgarejo et al., 2007, Pettit and Pullar, 2004). It should be mentioned that in these cases, only one scenario is generated rather than a series of alternative scenarios. These techniques have also been used in CA models to create the level of land use suitability (Wu and Webster, 1998). Likewise, maps based on binary-overlay have been used to generate different urban growth scenarios, employing different distance thresholds for urban zones and roads (Reginster and Rounsevell, 2006).

Furthermore, NN and ABM have been applied to create simulations of future land occupation scenarios, although there are significantly fewer studies which have used this approach (Almeida et al., 2008, Malczewski, 2004, White and Engelen, 1993), mainly due to a lack of clarity concerning the simulation process for NN models; these models have even been called the “black box of simulation”. Meanwhile, ABMs have been applied to model local agents, given that it is difficult or at least extremely complex, to integrate all the processes or agents involved in an urban system dynamic into a simulation of, for example, a metropolitan area. Nevertheless, in recent years, methodological frameworks have been developed for simulating models on a regional scale (Fontaine and Rounsevell, 2009, Valbuena et al., 2010).

Of the research cited here, the studies carried out by Barredo and Gómez Delgado (2008) and Winder (2006) will now be examined in more detail, since these present a series of scenarios for the Community of Madrid, the study area addressed in this present paper.

Firstly, we should indicate that both studies implemented the scenarios using MOLAND and METRONAMICA (Research Institute for Knowledge Systems) software, based on AC methodology. In order to produce a qualitative description of land use from 2000 to

2040, Barredo and Gómez Delgado (2008) took the Special Report on Emissions Scenarios (SRES) as a reference, and in particular the land use evolution patterns A1 (scattered growth), A2 (rapid urban growth) and B2 (compact development) produced by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In contrast, Winder (2006) consulted groups involved in land and environmental planning in order to describe, firstly, the Business As Usual scenario used to calibrate the model, and then an accelerated urban development scenario, and a further three scenarios related to the protection of agricultural ecosystems, protected natural areas and environmental corridors, from the year 2000 to 2025.

It should be emphasised that both studies have contributed new possibilities for assessing the impacts and needs deriving from urban growth (needs for transport, exposure to natural hazards, impact on climate change), in addition to assessing environmental sustainability of the territory. This is unquestionably of enormous use to land planners and organisations involved in policy making. Nonetheless, these scenarios present certain limitations. In the first place, one of the studies employed excessively generalised land use categories (for example, urban, woods, pasture, agriculture, etc.). In the second place, demand for future urban land was assessed on the basis of estimated projections contained in land use plans and/or proposals made by those organisations involved in scenario design, rather than being generated by a model which was capable of providing land demand calculations based on variations in parameters representative of each scenario's evolution. Finally, the application of techniques such as CA does not guarantee that land use will be assigned to the most appropriate places, since, for example, only slope is generally considered when assessing level of suitability. Although important effects such as the attraction (positive) and repulsion (negative) between certain uses (for example, forest zones reject urban zones), proximity and accessibility were considered in the calibration process of these models, this is insufficient to guarantee that the areas selected present the best suitability values for the development of, for example, urban zones or any other activity, nor that they are the most appropriate from the point of view of sustainable development, since they do not include a combination of factors which would maximize social and economic development at the same time as minimising any adverse impact on the environment.

Turning specifically to the region of Madrid, it is undeniable that this area is a source of interest to various researchers. This is mainly due to the influence the region has on economic development as a consequence of its role as the capital of Spain and of the Community of Madrid, making it an area of rapid land use change. For example, in the 90s, the region suffered enormous loss of agricultural and forest land use, mainly as a result of an approximately 50% increase in non-natural surfaces. Likewise, as a prerequisite of urban expansion, there was a significant increase in transport infrastructures creating important territory fragmentation problems (Aldana, 2005, OSE, 2006, Plata Rocha et al., 2009).

Given the present situation, we believe that the simulation of future urban growth scenarios (residential, commercial and industrial land use) is of interest for the Community of Madrid and with this in mind, we have explored and increased our understanding of the application of MCE techniques. These techniques enable the land use suitability of different scenarios to be determined, based on the integration of a combination of different factors with differing restrictions from an environmental and land planning perspective, thus rectifying some of the deficiencies of the other studies previously mentioned. The scenarios are based on formulations which integrate past urban growth trends, environmental concerns expressed by environmental protection groups, and present economic realities. As a result, images of the future are obtained facilitating the visualization, exploration, assessment and understanding of the driving forces behind the different scenarios, and an assessment of the consequences these could have on the environment in the future.

2. STUDY AREA AND DATA

The region of Madrid has undergone a rapid process of urbanisation in the last 10-15 years (Figure 1), which has principally translated into land occupation based on widespread, dispersed residential housing zones (EEA, 2006).

This process is reflected in the fact that approximately 50,000 ha were transformed into non-natural surfaces between 1990 and 2000, almost another 50% of the surface area in existence in 1990. This urban expansion, however, was not accompanied by a notable population increment; over this period, the population only increased by 5.16% (Aldana, 2005, OSE, 2006, Plata Rocha et al., 2009).

Recent studies have shown that this dynamic is to a great extent the consequence of demand for first and second homes, together with the increase in, and improvement of, transport infrastructures (López de Lucio, 2003, Serrano Cambronero et al., 2002). Furthermore, the exhaustive statistical study carried out by Plata Rocha et al. (in revision) demonstrated that variables such as proximity to urban zones, roads and the business centre of Madrid, increased number of houses, population density, the slope and altitude of the land or the proportion of surface area classified as urban, are all closely related to the urban dynamic of the Community of Madrid.

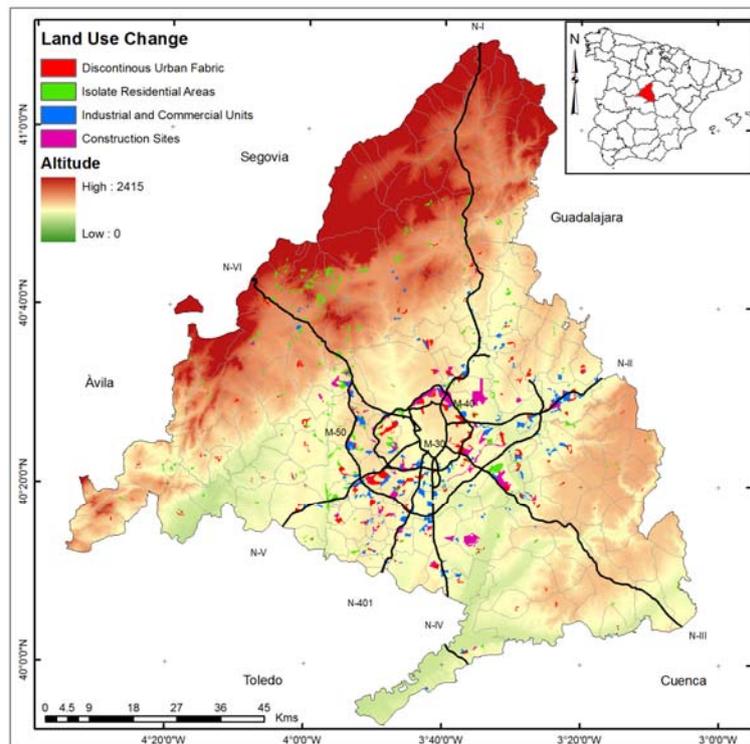


Figure 1. Urban growth in Madrid region (1990-2000)

Source. Corine Land Cover 1990 and 2000

Together with the factors mentioned above, the favourable socioeconomic climate experienced during this period in Spain has had a significant influence on the growth in demand for property. Similarly, improvements to transport networks and the rise in land prices have led to a model of decentralization among the productive and residential sectors; as a result, people have settled increasingly further from the established urban centres and this in turn has intensified dependence on the car for daily mobility. Moreover, as a result of this decentralization, the range of effects of pollution and landscape degradation, etc., has increasingly extended to areas far from zones which have already been heavily affected or anthropised (EEA, 2006).

Consequently, the urban area of Madrid is changing rapidly, and a new land use model is emerging – one which suffers from a series of problems of sustainability within a context of weak spatial planning, a common issue among large European conurbations where the regulatory powers of the authorities are insufficient to control the enormous pressures brought to bear by new land uses (López de Lucio, 2003). Nevertheless, this could be addressed by new public policies which sought to balance and redirect the current dynamic (Leboreiro, 1999, López de Lucio, 2003).

In order to construct the models, a series of spatial variables were compiled for the basis year (2000), using the existing literature on this type of study as a reference, but above all, bearing in mind the availability of information concerning the study area. Ultimately, the data compiled related to land use (Corine Land Cover), soil type, hydrography, roads, protected natural areas (Red Natura), vulnerability of aquifers to contamination, geotechnical map, undesirable installations, social facilities (medical and educational facilities), topography (altitude, slope, aspect), population and administrative boundaries. This information was collected from various official sources, including the Instituto Geográfico Nacional (National Geographic Institute), Instituto Geológico y Minero (Geological and Mining Institute), Consejería de Agricultura y Servicio de Cartografía Regional de la Comunidad de Madrid (Community of Madrid Department for Agriculture and Regional Cartography Service), Departamento de Estadística de la Consejería de Economía de la Comunidad de Madrid (Community of Madrid Treasury Statistics Department), and the University of Alcalá de Henares Geography Department, among others. The majority of the information was originally at a scale of 1:100,000, although in some cases it was necessary to use data at different scales. All information was processed using Idrisi Andes raster GIS software with a pixel size of 50m.

3. METHODOLOGY

There is always an element of uncertainty involved in scenario simulation, which increases the further into the future the simulation is projected. For this reason, we proposed generating medium term simulations, taking the year 2000 as a starting point (the last year for which *Corine Land Cover* data were available at the beginning of our research) and the year 2020 as the time horizon. In fact, the results of this study

coincided with the temporal context used for the alternative scenarios given in the Spanish Ministry of Public Works and Transport's Strategic Plan for Infrastructures and Transport (2004) and the Spanish Ministry of the Environment's Strategy for Climate Change and Clean Energy (2007), both of which present a 2020 time horizon.

As we mentioned earlier, the methodology used for scenario simulation normally comprises three stages: 1) qualitative proposal and description of the scenarios, 2) assessment of future urban land demand, and 3) simulation of different scenarios and calculation of the different future land use models. Figure 2 provides a schematic diagram of the methodological sequence followed to develop the different scenarios of future urban growth scenarios for the Community of Madrid.

Therefore, we first carried out a qualitative interpretation of up to three future urban growth scenarios (business as usual, crisis and innovation and sustainability), based on the evolution hypothesis proposed by the group of experts involved in the SimUrban project (<http://www.geogra.uah.es/simurban>). The description for each scenario was based on a series of demographic, social, economic, technological and environmental factors with the potential for influencing the development of the urban land uses considered (Aguilera Benavente et al., 2009). In this respect, we should mention that the simulated urban land uses were divided into residential and productive (the latter including all land used for industrial, commercial, etc., purposes).

Secondly, future demand for urban land was calculated using a System Dynamics-based model which generated demand for each scenario according to variations in rates of growth or decline for factors such as population and immigration, income, housing, homes, etc. (Aguilera Benavente et al., 2009).

Subsequently, a series of factors were chosen which previous studies had shown to bear a close relationship to urban growth, such as accessibility to roads and urban zones, proximity to areas of environmental interest, etc. (López de Lucio, 2003, Plata Rocha et al., in revision).

Among the existing MCE techniques, weighted linear combination (WLC) is one of the most widely used, because of its simplicity. Basically, this compensatory methodology adds the products of n parameters (weights, w_i) by n variables (maps, X_i) to obtain in

this case a map that provides the suitability of the territory for a certain future land use (M suitability), as shown in the following equation:

$$M_{\text{suitability}} = w_1 \cdot X_1 + w_2 \cdot X_3 + \dots + w_n \cdot X_n$$

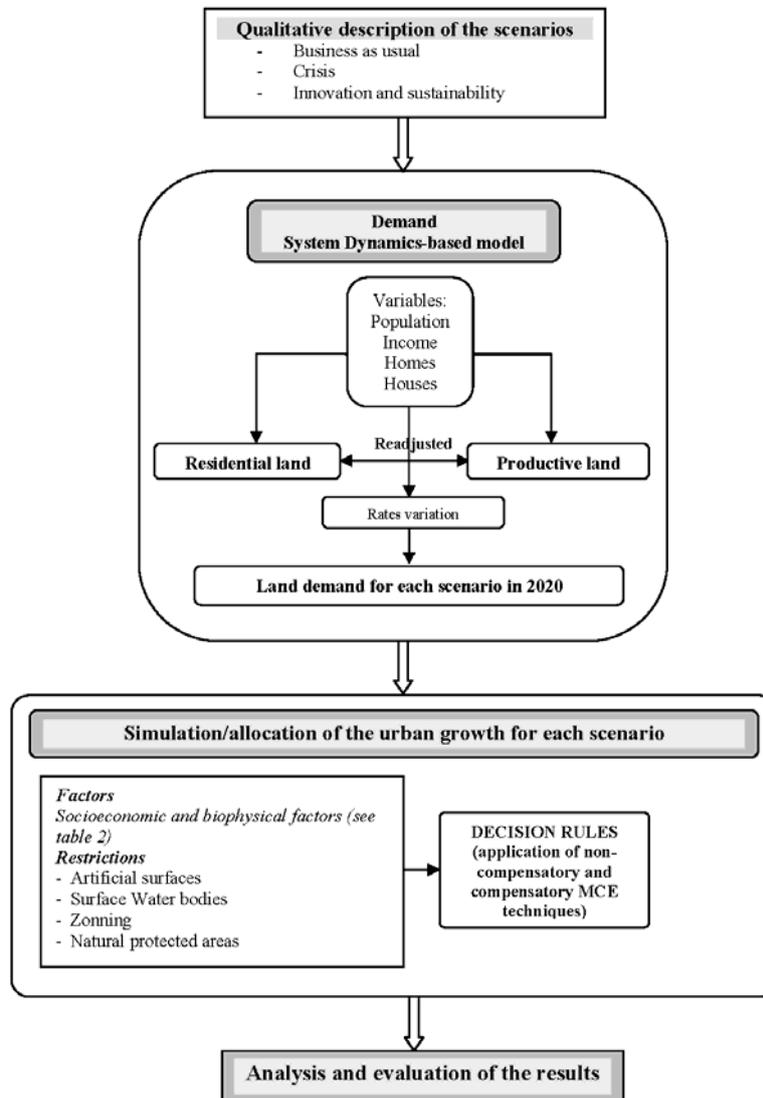


Figure 2. Methodological process.

Non-compensatory techniques are less used, but we think a joint application with compensatory techniques could help us to better perform the spatial simulation of each scenario. In this context, the Conjunctive/Disjunctive model enabled a threshold to be fixed for a series of factors, eliminating all the alternatives (areas of land or pixels) which fell above or below the threshold established (Malczewski, 1999, Gómez Delgado and Barredo, 2005). The aim here was to restrict the potential locations of new urban zones to those areas which, according to the analysis of spatial factors carried out in the study by Plata Rocha et al. (in revision), showed greatest probability of

undergoing urbanization. This was applied to factors specifically related to proximity to roads, urban centres, etc. The remaining factors were distributed along a continuous scale of suitability between 0 and 255, and were combined using the WLC method in order to obtain a definitive map of land suitability for new urban uses.

Finally, the assignment of future urban growth to each scenario was performed using the BuildSceneries tool designed specifically for allocation/simulating land use¹ (Rodríguez Álvarez et al., 2009). This tool optimises the time needed to simulate scenarios.

3.1. Qualitative interpretation of scenarios

As mentioned previously, 3 scenarios for urban growth were proposed, taking the year 2000 as a starting point, and the year 2020 as the time horizon. In this section, a brief description of each scenario is presented; further information is available in the study by Aguilera Benavente et al. (2009).

The first scenario proposed could be called “business as usual”, as it assumes the continuation and consolidation of the growth models and intensities witnessed for the period 1990-2000.

The second scenario, the “crisis” scenario, reflects the image of a state of collapse, which posits the advent of a protracted period of crisis with significant consequences for metropolitan growth processes.

Lastly, the “innovation and sustainability” scenario was proposed, which implies an about-turn in existing models of metropolitan development and an attempt to find a balance between social, economic and environmental aspects. This scenario proposes more sustainable patterns of growth, with diversification of productive systems deriving from innovation as an economic driving force.

3.2. Urban land demand for the different scenarios

Urban land demand for 2020 and for each scenario was generated externally using a System Dynamics-based model. A model was designed which related different

¹ Tool available at: <http://www.geogra.uah.es/simurban/publicaciones.php> (last viewed May 2010).

socioeconomic and demographic variables, and also interacted with growth in residential and productive surface areas (Aguilera Benavente et al., 2009).

Information on population, immigration, number of houses, number of homes, income, residential and productive surface areas, etc., for the years 1990 to 2000 was used to calibrate the model. Once the System Dynamics-based model had been adjusted for these variables, some of the rates were readjusted (increasing or reducing their value, or maintaining them as they were), according to the hypothesis proposed for each scenario. At the end of this process, it was possible to extract the volume of demand for the year 2020 (Table 1).

Table 1. Urban land demand for each of the scenarios in the year 2020

| No. | Scenario | Demand for Residential use (ha) | Demand for Productive use (ha) |
|-----------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| <i>S1</i> | Business as usual | 28.414 | 17.356 |
| <i>S2</i> | Crisis | 17.520 | 13.330 |
| <i>S3</i> | Innovation and Sustainability | 17.618 | 10.836 |

In the case of *S1*, demand for residential and productive land is related with the number of homes and houses and to the increased income of the residents, which would favour a certain level of economic development and therefore an increase in residential and productive land demand. Meanwhile *S2* maintained a constant demand for residential and productive land which was lower than that of *S1*, primarily because demand for housing falls in times of crisis, and particularly demand for second homes, a fact which is corroborated by the negative income levels. Finally, *S3* land demand was lower than that for *S1* and similar to that of *S2*, indicating a change in social values towards more sustainable development of resources, with a balance between the number of homes and houses based mainly on recycling of urban land. Demand for productive land was lower than that for the other two scenarios, given that this scenario implied the use of new technologies in productive activity, leading to lower consumption of land and an increase in levels of economic development.

3.3. Scenario implementation and spatial assignation rules

In order to model each of the scenarios, the most appropriate factors were selected which would enable the reproduction of the essential and differentiating characteristics of each (Table 2). The study by Plata Rocha et al., (in revision) was taken into consideration at this stage, as it explored and determined the influence of certain spatial

variables on the emergence and location of new residential and productive zones. Factors such as accessibility of roads, urban zones, industry, commerce and hospitals, and topography exercised a strong stimulus on the growth of new urban zones between 1990 and 2000.

Table 2. Factors used to simulate the three urban growth scenarios (Plata et al. 2010)

| N. | Factors | Modeling factors for each scenario | | |
|------|--|--|--|---|
| | | Business as usual | Crisis | Innovation and sustainability |
| F1. | Land use (CLC2000) | Land uses usually occupied for urban expansions in the past are more suitability to be urbanized in the future. | | Land uses with special environmental or productive value are less suitability to be urbanized |
| F2. | Vulnerability of aquifers to contamination | Not included | | Impermeable areas are more suitability to be urbanized. |
| F3. | Soil type | Soils usually occupied for urban expansion in the past are more suitability to be urbanized in the future. | | Soils with high productivity are less suitable to be used for residential use |
| F4. | Slope | Not included | Slopes between 0 and 10% have a lineal suitability decrement. Slopes upper 10% have suitability = 0. | |
| F5. | Distance to roads | The new urbanized areas will be located only on the distance intervals (buffers from roads in 2000) where the urbanization process have occurred in the past | | The suitability increase in the surrounding of the main roads |
| F6. | Distance to urban centres | The new urbanized areas will be located only on the distance intervals (buffers from urban zones in 2000) where the urbanization process have occurred in the past | | Taking into account the principles contained in the European Spatial Development Perspective (ESDP), the suitability increase near the medium size municipalities and decrease near the biggest cities and rural villages |
| F7. | Geo-technical-risk | Not included | | This information is used to avoid the urbanization on seismic zones, fault lines or unstable areas |
| F8. | Distance to Hospitals | Not included | Areas closer to hospital centres in 2000 are more suitable to be urbanized | |
| F9. | Aspect | Not included | | The suitability increases in the South or Southeast-oriented zones, with more climatic comfort due to the insolation (hours/day) |
| F10. | Distance to commercial centres | Not included | Areas closer to commercial centres in 2000 are more suitable to be urbanized | |
| F11. | Distance to industry | Not included | In general the mixed used-development is more desirable. In the case of industrial areas, the objective is to develop new areas close to the industrial areas in 2000. | |
| F12. | Distance (weighted) to population | This factor is used in two ways: 1. New commercial zones will be located close to those urban zones in 2000 with high amount of population with spending power (from 25 to 64 years old) 2. New industrial zones will be far from those urban zones in 2000 with high amount of vulnerable population (< 15 and > 65 years old). | | |
| F13. | Transport network nodes | The new urbanized areas will be located only on the distance intervals (buffers from important network nodes in 2000) where the urbanization process have occurred in the past | | Not included |

Lastly, all artificial surfaces, water bodies and courses and protected non-urban zones in existence in 2000 were classified as restricted areas for these uses, in line with current planning legislation in force in all municipal councils in the region.

Once the decision rules for the spatial representation were assigned, the Conjunctive/Disjunctive and WLC techniques were used to perform the simulation in S1 and S2 and WLC for S3.

3.3.1. *Business as usual scenario (S1)*

Here, the assignation of future urban growth was determined by past trends, specifically between 1990 and 2000. Before going on to describe the different scenarios, we would like to emphasise that the starting point was the year 2000, at a time when the property boom was at its peak in the Community of Madrid. The business as usual scenario, therefore, does not represent a particularly desirable scenario with which to compare and evaluate other future situations represented in other scenarios.

In an attempt to reproduce the reasons behind the growth which has occurred in the past, the factors shown in Table 3 were considered. In this case, the factors of accessibility to roads and urban zones were combined through the use of the conjunctive/disjunctive method, and the eliminatory distance thresholds used were those indicated by an analysis of growth probability for the simulated categories (residential and productive) (Plata Rocha et al., in revision). Thus, for example, any new urban area should be located within 4 km of an already existing road, whereas a new commercial zone would need to be within 3 km. Likewise transport network nodes have exercised a significant influence on the location of commercial zones in the past, with almost 80% of these being located within a radius of less than 3km from such nodes. Accordingly, the distance threshold for new commercial zones in this continuity scenario was considered to be less than 3km from the main connection nodes. Once a map of the study area which complied with these conditions had been obtained (Figure 3a), a WLC was applied to the remaining factors (see Table 3 and Figure 3b).

Table 3. Business as usual Scenario: factors used for the simulation

| MCE method | Factors | Residential | Commercial | Industrial |
|------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Compensatory | Lad use (CLC2000) | <i>Weight = 1.00</i> | <i>Weight = 0.90</i> | <i>Weight = 0.80</i> |
| | Distance (weighted) to population | ----- | <i>Weight = 0.10</i> | ----- |
| | Soil type | ----- | ----- | <i>Weight = 0.20</i> |
| Non-compensatory | Distance to roads | < 4000 m. | < 3000 m. | < 3000 m. |
| | Distance to urban centres | < 3000 m. | < 5000 m. | < 3000 m. |
| | Transport network nodes | ----- | < 3000 m. | ----- |

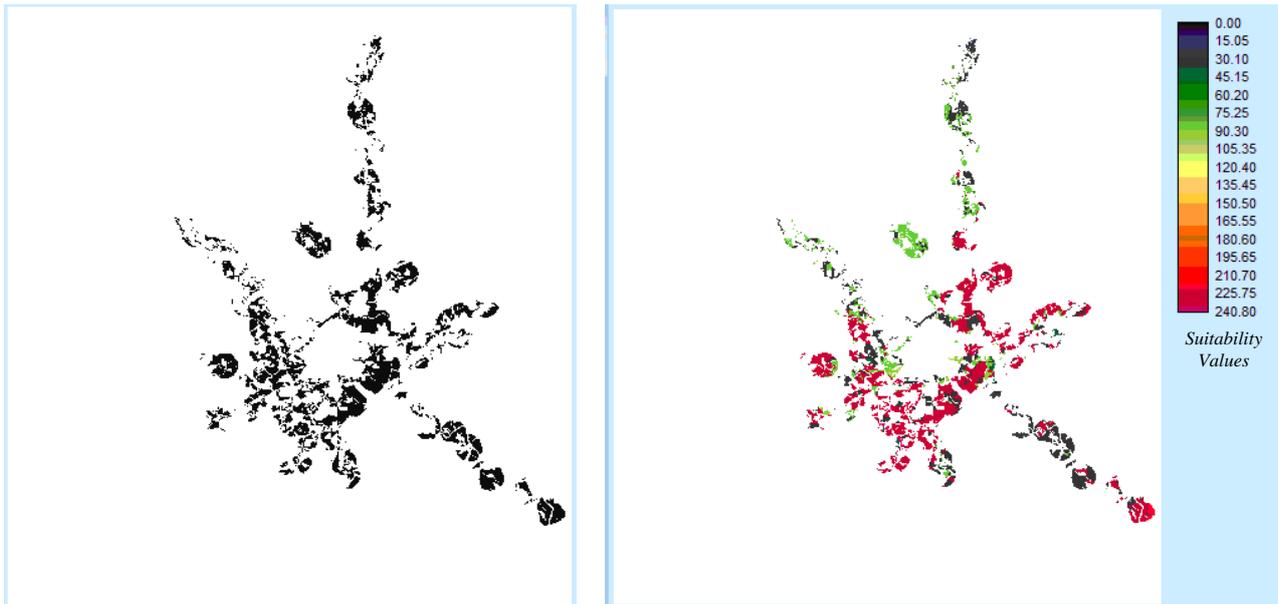


Figure 3. Map showing the territory where new commercial zones could be located, using a non-compensatory MCE technique with the constrained factors listed in table 3 (left). Final map showing the suitability of the territory, once the WLC were applied with the rest of the compensatory factors listed in table 3 (right).

3.3.2. Crisis scenario (S2)

In this scenario, the spatial distribution of future urban growth contained significant changes to the form and intensity of growth shown in the past. In fact, residential and productive demand for land was appreciably reduced.

For this scenario, factors were included which permitted the inclusion of patterns and locations for new urban zones based on policies which minimised economic costs, using existing infrastructure and services. Furthermore, it included very few conditions indicating sustainable evolution of land and the environment. In this respect, new urban areas were assigned on the basis of past patterns, to a large extent consuming those land uses and types of greatest environmental and productive value.

Thus, factors such as accessibility to commercial zones and weighted distance from urban centres with a greater percentage of the population with purchasing power were designed so that distribution of the new commercial zones would maximize access to potential users. Similarly, the factor, accessibility to industry, attempted to create large areas reserved for this activity, minimizing the distance between them. The accessibility to hospitals and commerce factors were also included, in order to maintain the well-being of the population and access to these services (Table 4). Using the same

methodology as in the previous scenario, the Conjunctive/Disjunctive method was applied in order to restrict the area of urban expansion to zones showing the greatest probability of change according to data analysed from 1990 – 2000, as a function of proximity factors (these appear in Table 4 with the threshold established for each one). The remaining factors were combined using the WLC method (Table 4 gives the weight assigned).

Table 4. Crisis Scenario: factors used for the simulation

| MCE method | Factors | Residential | Commercial | Industrial |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|
| Compensatory | Lad use (CLC2000) | <i>(Weight = 0.80)</i> | <i>(Weight = 0.80)</i> | <i>(Weight = 0.70)</i> |
| | Soil type | ----- | ----- | <i>(Weight = 0.20)</i> |
| | | <i>Monotonically increasing</i> | ----- | <i>Monotonically increasing</i> |
| | Distance to hospitals | <i>0 to 10.000 m.</i> | ----- | <i>> 3.000 m.</i> |
| | | <i>(Weight = 0.10)</i> | | <i>(Weight = 0.10)</i> |
| | Distance (weighted) to population | ----- | <i>(Weight = 0.20)</i> | ----- |
| | Slope | <i>(Weight = 0.10)</i> | ----- | ----- |
| Non-compensatory | Distance to roads | < 4.000 m. | < 3.000 m. | < 3.000 m. |
| | Distance to urban centres | < 3.000 m. | < 3.000 m. | ----- |
| | Distance to industry | ----- | ----- | < 3.000 m. |
| | Distance to commercial centres | ----- | >2.000 y | ----- |
| | | | <10.000 m. | |
| | Transport network nodes | ----- | < 3.000 m. | ----- |

3.3.3. Local innovation and sustainability scenario (S3)

Up to 12 factors were considered for this scenario, with the aim of obtaining a more detailed description of land suitability for the allocation of new urban zones. These factors are subsumed within the three basic tenets of sustainable development, uniting economic and social development with environmental protection (Table 5). For example, modelling of the factor accessibility to urban zones was carried out observing the principle that areas closest to actual medium and intermediate sized urban centres would be the most suitable for urbanisation, whilst those close to a big metropolis such as Madrid, or rural towns, would be the least suitable. In addition, the model aimed to maintain vulnerable population groups (children and those over 65) at a distance from new industrial growth. Furthermore, in order to model the factor land use, land was zoned according to agricultural and livestock rearing characteristics of the region on the one hand, and environmental value of land uses, on the other.

Table 5. Innovation and sustainability scenario: factors used for the simulation

| MCE method | Factors | Residential | Commercial | Industrial |
|---------------------|---|-------------|------------|------------|
| Compensatory | Land use (CLC2000) | 0.18 | 0.15 | 0.29 |
| | Vulnerability of aquifers to contamination | 0.04 | 0.02 | 0.06 |
| | Soil type | 0.09 | 0.07 | 0.12 |
| | Slope | 0.03 | 0.02 | 0.02 |
| | Distance to Roads | 0.16 | 0.21 | 0.16 |
| | Distance to urban centres | 0.21 | 0.17 | 0.12 |
| | Distance to commercial centres | | 0.15 | |
| | Distance to industry | | | 0.09 |
| | Geo-technical-risk | 0.08 | 0.06 | 0.04 |
| | Distance to Hospitals | 0.13 | 0.06 | |
| | Distance (weighted) to vulnerable population | | | 0.10 |
| | Distance (weighted) to population with spending power | | 0.09 | |
| | Aspect | 0.08 | | |

4. RESULTS

4.1. Allocation of future urban growth

Once the qualitative description had been defined, land demand calculated and factors established for each scenario, the simulation of urban growth for the year 2020 and the three scenarios proposed was obtained.

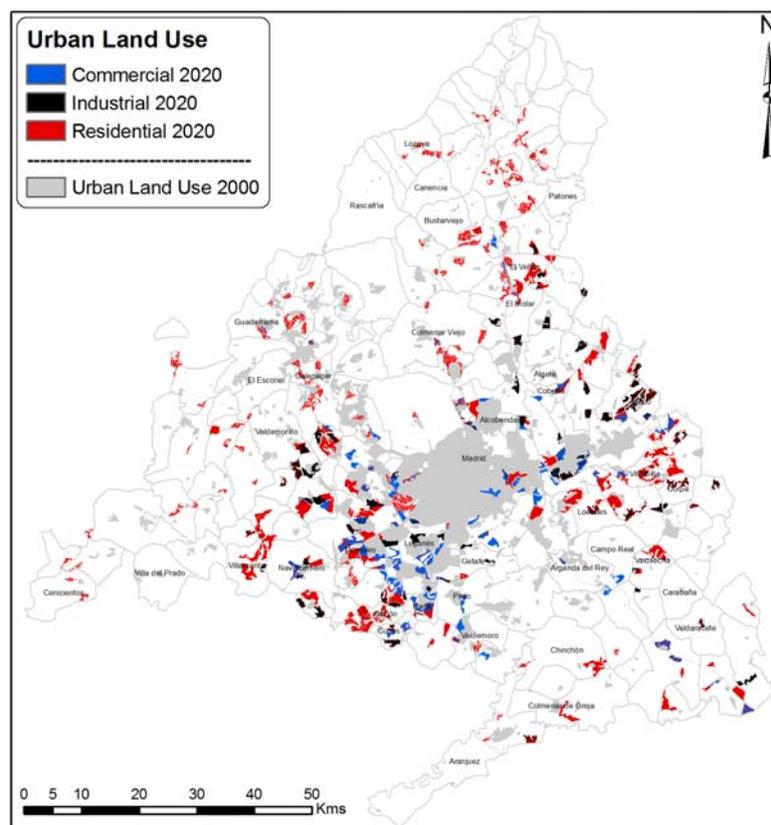
On the basis of a first visual analysis of the results, it was possible to confirm that the spatial patterns for land use proposed for 2020 corresponded to the hypotheses assumed for each scenario (Figure 4).

Figure 4a gives the results for the scenario which attempted to illustrate the situation in 2020 if the urban development trends registered for the period 1990 – 2000 continued (business as usual). As can be seen, residential zone growth in this scenario is dispersed throughout the region, primarily consuming land suitable for agricultural and livestock rearing activities. Such dispersal would generate new needs in terms of transport infrastructures with a concomitant increase in the use of private transport, together with further fragmentation of the landscape and an increase in environmental pollution. Commercial and industrial zones proliferated around urban centres, mainly in the south west and east of the region.

If these results are compared with those for the crisis scenario shown in Figure 4b, it can be seen that the crisis scenario depicts less dispersal of residential zones, which are primarily concentrated around the metropolitan area of Madrid. At the same time,

productive zones are basically linked to main roads, both to the northeast and southwest of Madrid. This distribution pattern implies an attempt to balance the situation of the area, where socioeconomic differences with the rest of the region would be rectified through urbanisation and productive centres in areas of high accessibility and on abandoned agricultural land which, due to the low economic productivity it represents, commands a low price on the property market.

Figure 4c depicts the image of land occupation resulting from a context of innovation and sustainability. The prevailing pattern is one of compact development, where growth of new residential zones has occurred mainly in proximity to medium and intermediate sized urban centres and where, from a social, economic and environmental point of view, efficient use has been made of land, corresponding to sustainable land planning policies. Commercial zones have been assigned according to the criterion of maximizing access to potential users, located close to residential zones and with appreciable distances between them. Regarding industrial zones, it can be seen that these have been assigned to zones with access to roads, and some distance from urban areas, with the aim of maintaining the well-being of the population.



a) *Business as usual*

4.2. Evaluation of the changes in land occupation and distribution patterns of the new urban zones in the three scenarios

This section will present a basic quantitative evaluation of some aspects of interest concerning the type of urban expansion in each of the simulated scenarios.

Firstly, it can be said that the allocation of the new residential and productive zones has mainly implied the loss of non-irrigated arable land, natural grassland and herbaceous vegetation. In Figure 5, it can be seen that S1 is the scenario that has consumed the greatest surface area of natural grassland and non-irrigated arable land. It is also evident that S2 has caused a reduction in non-irrigated arable land, and to a lesser extent, in natural grassland. The S3 scenario has basically expanded over non-irrigated arable land, and to a lesser extent, herbaceous vegetation and natural grassland. It should be borne in mind that the first two scenarios have been established in an area of influence around roads, urban centres, commercial zones or transport network nodes already in existence. To a certain extent, this implies reduced effects on natural vegetation, since the location of these new urban developments has been restricted to areas which are already heavily influenced or anthropised, and thus the presence of natural vegetation is already residual.

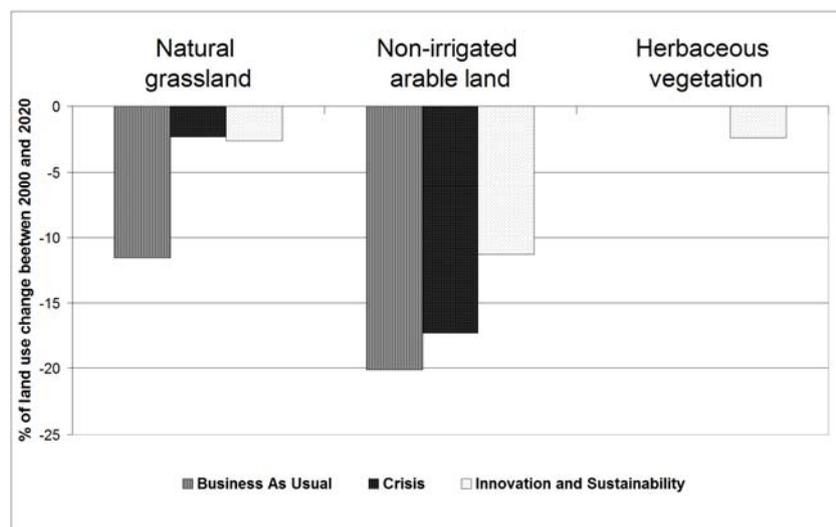


Figure 5. Decrement of the three main categories occupied for the new urban zones in each scenario (with respect to the area in 2000)

Secondly, a simple evaluation of the growth pattern for urban zones were conducted, based on location with respect to the city of Madrid and to medium and intermediate sized urban centres. In Figure 6 it can be seen that urban zone will growth in all three

scenarios occurred primarily in the inner- and outer-ring suburbs. Nevertheless, in the S1 scenario, significant growth also occurred in inner and outer exurban zones and throughout the region. This indicator confirmed the model of dispersed growth with respect to the metropolitan area of Madrid presented in the Business as usual scenario. However, it can be seen that the other two scenarios (S2 and S3) also generated significant growth, above all within Madrid territory. Therefore, it was necessary to carry out an assessment considering other indicators, which depicted the distribution of urban growth more clearly.

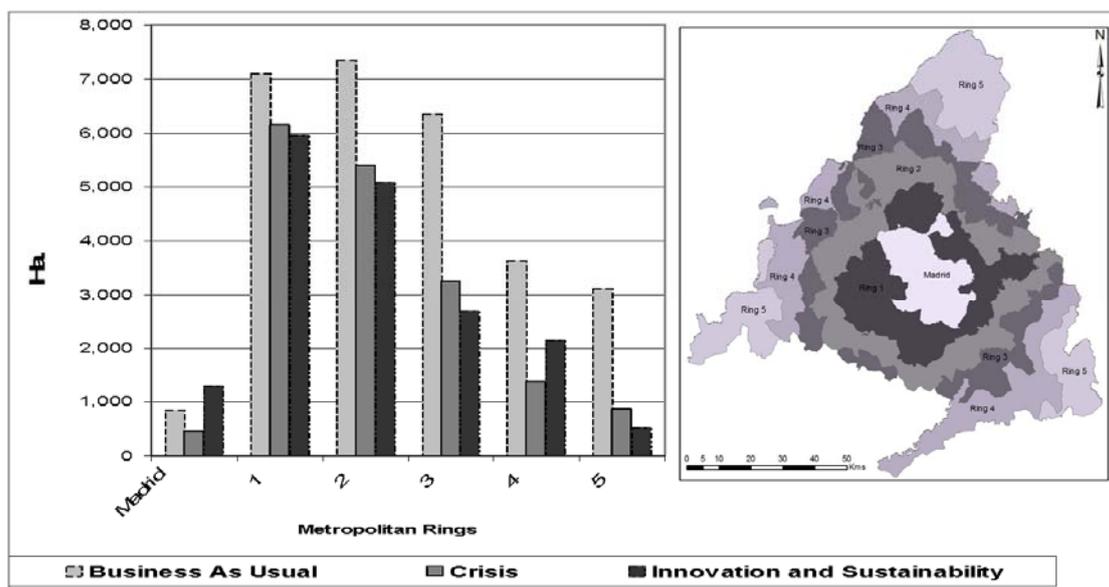


Figure 6. Urban growth in the metropolitan rings of Madrid region for each scenario

One alternative was to consider the distance from medium and intermediate sized urban centres.

The results obtained from this analysis showed that the innovation and sustainability scenario (S3) presented a less dispersed growth pattern, primarily located within 5km and displaying an almost zero rate of urban development beyond 10km from these centres. The crisis scenario (S2) also showed less dispersal, although it did present a reduced number of urban centres up to 30km distant. The business as usual scenario (S1) showed most dispersal, with growth appearing up to 40km away, and presenting expansion throughout the region (Figure 7).

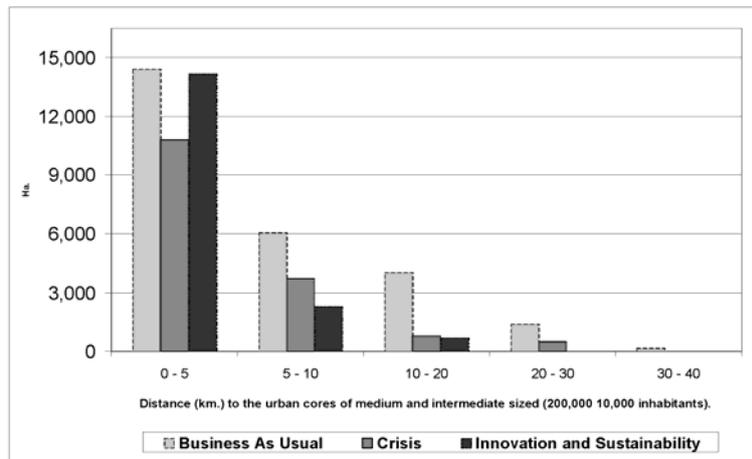


Figure 7. Spatial distribution of new residential areas in terms of distance to the medium and intermediate sized urban centres in 2000

As regards industrial zones, it can be seen that the majority were located at less than 3 km from urban zones. This indicates that the scenarios presented a considerable mixture of urban land use, facilitating population access to both the workplace and recreational opportunities. Similarly, some industrial zones were located at distances greater than 15 km from urban zones, and these would be suitable for the location of potentially hazardous industries (Figure 8a). From Figure 8b, it can be concluded that the crisis and innovation and sustainability scenarios presented better accessibility to industrial zones, maintaining the largest surface areas at a distance of less than 1km from roads.

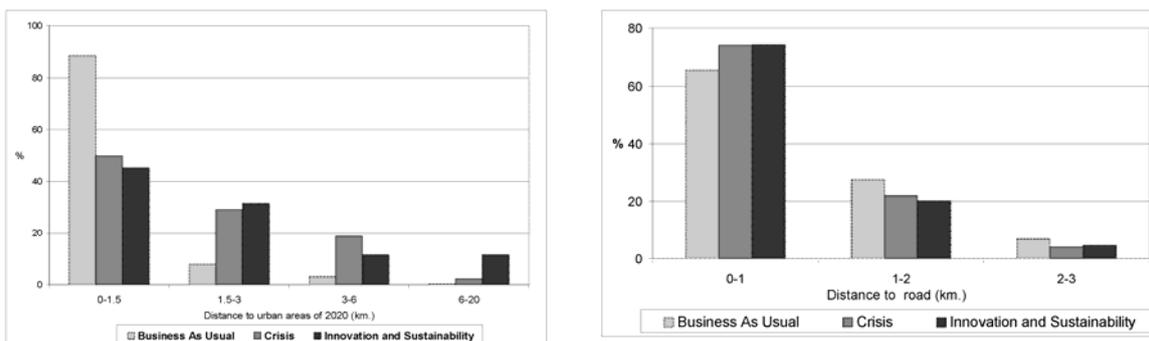


Figure 8. A) Distance from new industrial areas to new residential areas in each scenario. B) Distance from new industrial areas to road network in 2000

5. CONCLUSIONS

With regard to methodology, we can confirm that the results obtained have demonstrated that the use of standardised models based on MCE techniques represents an efficient alternative for simulating future urban growth scenarios. In contrast to other

predictive models, these permit the integration of a wide range of economic, social and environmental factors, facilitating the consideration of the three fundamental dimensions of sustainable development. Furthermore, we have been able to demonstrate that the combination of compensatory and non-compensatory techniques made it possible to reproduce more realistic conditions in each of the scenarios.

Likewise, the methodological framework proposed enabled the integration of a System Dynamics-based model to generate land demand for the 2020 scenarios. The model was calibrated with the time period 1990 – 2000 using a series of socioeconomic and demographic non-spatial variables on a local, regional and national scale, the rates of which were subsequently adjusted according to the evolution hypothesis for each scenario.

Implementation of factors in the business as usual and crisis scenarios was based on an exhaustive analysis of the behaviour of certain spatial variables, and the urban dynamics observed in the past (Plata Rocha et al., in revision), enabling a realistic reproduction of the different future alternatives to be achieved, in addition to integrating regional urban planning into the simulation as a guideline for assigning future urban zones.

As regards the results obtained for the urban growth scenarios, it was possible to identify the contrasts, imbalances or benefits which might arise in the Madrid region if the evolution hypotheses proposed for each of the future scenarios are accepted or not. These scenarios provide important information concerning the potential environmental, territorial, economic and social impacts which would emerge if present planning policies, economic growth based on property speculation (S1), the present economic recession (S2), and/or sustainable development alternatives continue.

Thus, the results demonstrate the divergence presented by the business as usual scenario (S1) from European environmental and transport policies, generating considerable pressure on land and producing irreversible harm to the environment. Although a period of economic crisis (S2) maintains these trends at a minimum, this is due to the specific context of a crisis, rather than to consideration of environmental policies during the planning process. In this scenario, new patterns of urbanisation and spatial and economic reorganization should emerge, aimed primarily at medium sized cities acting as regional centre. When innovation is considered as the driving force behind economic

development and good practice in the planning process (S3), positive and desirable effects are observed, directing the model towards greater economic and social development in the region, and minimizing adverse effects on the environment, due principally to the inclusion of sustainability criteria in the planning process, less consumption of land for productive activities and recycling of urban land (Table 6).

Finally we would like to highlight the fact that scenario simulation represents a useful tool for integrating the opinions of the different agents involved in planning, with a view to formulating more participative and informed territorial strategies.

Table 6. Scenarios impacts

| Point of view | Effects | Escenarios | | |
|---------------|---|------------------------|-------------|------------------------------------|
| | | Business as usual (S1) | Crisis (S2) | Innovation and sustainability (S3) |
| Environmental | Urban sprawl | +++ | -- | -- |
| | High land consume and landscape fragmentation | ++ | - | - |
| | Pressure over natural areas | ++ | - | -- |
| | Urban pollution | ++ | - | - |
| | Problems of sealed soil | ++ | - | -- |
| Economic | Demografic increment | = | = | = |
| | Economic development | ++ | -- | +++ |
| | Use of new technologies | -- | - | ++ |
| Social | Quality of life | --- | - | ++ |
| | Preservation of rural areas | --- | + | +++ |
| | Accesibility to facilities | --- | + | +++ |

6. ACKNOWLEDGMENTS

This research was performed in the context of SIMURBAN project (Analysis and Simulation of the urban growth using Geographic Information Technologies. Sustainability Evaluation) (SEJ2007-66608-C04-00/GEOG), funded by the Spanish Ministry of Science.

7. REFERENCES

- Aguilera Benavente F, 2006, "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares" *GeoFocus* 6 81-112.
- Aguilera Benavente F, 2008, *Análisis espacial para la ordenación eco-paisajista de la aglomeración urbana de Granada*, Spanish PhD dissertation, Universidad de Granada, Granada, Spain.

- Aguilera Benavente F, Plata Rocha W, Bosque Sendra J, Gómez Delgado M, 2009, “Hacia la simulación de escenarios futuros de demanda de ocupación de suelo en ámbitos metropolitanos”, in Proceedings of II Internacional Conference on Sustainability Measurement and Modelling, 1-21, Terrassa, España.
- Aldana AT, 2005, “Cartografía de los cambios en las cubiertas artificiales de la Comunidad de Madrid-España” *Revista forestal latinoamericana* 35 59-86.
- Almeida C M, Gleriani J M, Castejon E F, Soares-Filho B S, 2008, “Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics” *International Journal of Geographical Information Science* 22 (9) 943-963.
- Barredo JI, Kasanko M, McCormick N, Lavalle C, 2003, “Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata” *Landscape and Urban Planning* 64 (3) 145–160.
- Barredo JI, Demicheli L, Lavalle C, Kasanko M, McCormick N, 2004, "Modelling future urban scenarios in developing countries: an application case study in Lagos, Nigeria" *Environment and Planning B: Planning and Design* 31 (1) 65-84.
- Barredo JI, Petrov L, Sagris V, Lavalle C, Genovese E. 2005, Towards an integrated scenario approach for spatial planning and natural hazards mitigation, (Joint Research Centre, European Commission, Italy).
- Barredo Cano JI, Gómez Delgado M, 2008, “Towards a set of IPCC SRES urban land-use scenarios: modelling urban land-use in the Madrid region”, in *Modelling Environmental Dynamics, Advances in Geomatic Solutions* Eds. M Pagelow and M.T. Camacho (Springer) pp. 363- 385.
- Busch G, 2006, “Future European agricultural landscapes - What can we learn from existing quantitative land use scenario studies?” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 (1) 121-140.
- de Nijs TCM, de Niet R, Crommentuijn L, 2004, “Constructing land-use maps of the Netherlands in 2030” *Journal of Environmental Management* 72 (1-2) 35-42.
- Dockerty T, Lovett A, Appleton K, Bone A, Sunnenberg G, 2006, “Developing scenarios and visualisations to illustrate potential policy and climatic influences on future agricultural landscapes” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 (1) 103-120.
- European Environment Agency 2006 *Urban sprawl in Europe, the ignored challenge.* (EEA Report No 10/2006).
- European Environment Agency 2007 *Land-use scenarios for Europe: qualitative and quantitative analysis on a European scale. Technical report No. 9.* European Environment Agency (Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg).
-

- Fontaine CM, Rounsevell, MDA, 2009 “An agent-based approach to model future residential pressure on a regional landscape” *Landscape Ecology* 24 (9) 1237-1254.
- Forrester J, 1969 *Urban Dynamics* (Productivity Pres., Portland).
- Gómez Delgado M, Barredo Cano JI, 2005 *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio* (Editorial RA-MA, Paracuellos de Jarama).
- Guhathakurta S, 2001, *Urban Modelling as Story telling: Using Simulation Models as a Narrative*, Working Papers Series, Centre for Advanced Spatial Analysis (University College, London) <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper37.pdf>.
- Han J, Hayashi Y, Cao X, Imura H, 2009, “Application of an integrated system dynamics and cellular automata model for urban growth assessment: A case study of Shanghai, China” *Landscape and Urban Planning* 91 (3) 133–141.
- Hoogeveen Y, Ribeiro T, 2005, *Land use scenarios for Europe Regional case studies Estonia, The Netherlands, Northern Italy*, PRELUDE Report, European Environment Agency <http://scenarios.ewindows.eu.org>.
- Hu Z, Lo CP, 2007, “Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression” *Computers Environment and Urban Systems* 31 (6) 667–688.
- Leboreiro A, 1999, “De la teoría a la práctica en la planificación territorial” *Urban* 3 68-79.
- López de Lucio R, 2003, “Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid” *Urban* 8 124-161.
- Malczewski J, 1999, *GIS and Multicriteria Decision Analysis* (John Wiley & Sons, Inc, New York).
- Malczewski J, 2004, “GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview” *Progress in Planning* 62 (1) 3–65.
- Metzger MJ, Rounsevell MDA, Acosta-Michlik L, Leemans R, Schroter D, 2006, “The vulnerability of ecosystem services to land use change” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 69-85.
- Ministerio de Fomento de España, 2004 *Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte. Definición y evaluación de escenarios alternativos*, http://peit.cedex.es/documentos/escenpeit_final.pdf.
- Ministerio de Medio Ambiente de España, 2007, *Estrategia Española de Cambio Climático y Energías Limpias horizonte 2007 – 2012 – 2020* http://www.mma.es/secciones/cambio_climatico/documentacion_cc/estrategia_c/pdf/est_cc_energ_limp.pdf.

- Molero Melgarejo E, Grindlay Moreno, AL, Asensio Rodríguez JJ, 2007, “Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio” *GeoFocus* 7 120 - 147.
- Nakicenovic N, Swart R, 2000, *Special Report on Emissions Scenarios* (Cambridge University Press, Cambridge, UK).
- OSE, Observatorio de la Sostenibilidad en España, 2006, *Cambios de ocupación del suelo en España. Implicaciones para la sostenibilidad* (OSE, Alcalá de Henares, España).
- Pettit CJ, 2002, *Land use planning scenarios for urban growth: a case study approach* PhD Thesis, University of Queensland.
- Pettit C, Pullar D, 2004, “A way forward for land-use planning to achieve policy goals by using modeling scenarios” *Environment and Planning B: Planning and Design* 31 (2) 213-233.
- Plata Rocha W, Gómez Delgado M, Bosque Sendra J, 2009, “Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la comunidad de Madrid (1990-2000)”, *Scripta-Nova* XIII (293) <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-293.htm>
- Plata Rocha W, Gómez Delgado M, Bosque Sendra J, in revision, “Factors explaining land urban growth in Madrid region (Spain) between 1990-2000”, *The Annals of Regional Science*.
- Plata Rocha W, Gómez Delgado M, Bosque Sendra J, 2010 “Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica”, *Geofocus* 10, pp. 103-134.
- PLUREL, 2010 *Peri-urban Land Use Relationships – Strategies and Sustainability Assessment Tools for Urban – Rural Linkages*, University of Copenhagen <http://www.plurel.net/>.
- Reginster I, Rounsevell M, 2006, “Scenarios of future urban land use in Europe” *Environment and Planning B: Planning and Design* 33 (4) 619-636.
- Reidsma P, Tekelenburg T, van den Berg M, Alkemade R, 2006, “Impacts of land-use change on biodiversity: An assessment of agricultural biodiversity in the European Union” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 (1) 86-102.
- Rodríguez Álvarez Y, Plata Rocha W, Salado García MJ, Gómez Delgado M, Bosque Sendra J, 2009, “Herramienta para la asignación óptima de usos del suelo”, *Proceedings of II Internacional Conference on Sustainability Measurement and Modelling*, 1-13, Terrassa, España.
- Rounsevell MDA, Reginster I, Araujo MB, Carter TR, Dendoncker N, Ewert F, House JI, Kankaanpää S, Leemans R, Metzger MJ, 2006, “A coherent set of future land use change scenarios for Europe” *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114 (1) 57-68.
-

- Serrano Cambronero M, Gago García C, Antón Burgos FJ, 2002 Impacto territorial de las carreteras orbitales de la Comunidad de Madrid (Dirección General de Investigación, Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid, España).
- Schwarz N, Haase D, Seppelt R, 2010, “Omnipresent sprawl? A review of urban simulation models with respect to urban shrinkage” *Environment and Planning B: Planning and Design* (doi:10.1068/b35087).
- Solecki WD, Oliveri C, 2004, “Downscaling climate change scenarios in an urban land use change model” *Journal of Environmental Management* 72 (1-2) 105-115.
- Valbuena D, Verburg PH, Bregt AK, Ligtenberg A, 2010, “An agent-based approach to model land-use change at a regional scale” *Landscape Ecology* 25 (2) 185-199.
- Van Meijl H, van Rheenen T, Tabeau A, Eickhout B, 2006, “The impact of different policy environments on agricultural land use in Europe” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 (1) 21-38.
- Verburg PH, Schulp CJE, Witte N, Veldkamp A, 2006, “Downscaling of land use change scenarios to assess the dynamics of European landscapes” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 (1) 39–56.
- Westhoek HJ, van den Berg M, Bakkes JA, 2006, “Scenario development to explore the future of Europe’s rural areas” *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 (1) 7-20.
- White R, Engelen G, 1993, “Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns” *Environment and Planning A* 25 (8) 1175-1199.
- Winder N, 2006, Final Report of the project Time-Geographical approaches to Emergence and Sustainable Societies (TiGrESS). School of Historical Studies, University of Newcastle, United Kingdom. Retrieved October, 2009 from <http://www.tigress.ac/tigshome.htm>.
- Wu F, Webster CJ, 1998, “Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation” *Environment and Planning B: Planning and Design* 25 (1) 103–126.
- Yeh A., Li X, 2001, “A constrained CA model for the simulation and planning of sustainable urban forms by using GIS” *Environment and Planning B: Planning and Design* 28 (5) 733–753.

Capítulo 6

Propuesta de análisis de sensibilidad explícitamente espacial para un modelo de simulación de crecimiento urbano

Publicación:

Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2010). “Sensitivity analysis for spatial simulation of urban growth”, *Sixth International Conference on Sensitivity Analysis of Model Output*, Milán, Italia (Resumen extenso).

RESUMEN

El análisis de sensibilidad (AS) en modelos de simulación espacial es imprescindible para dar robustez y credibilidad a los resultados obtenidos. No obstante, esto es algo que no es muy aplicado, al menos en modelos de asignación de usos de suelo, y en los pocos casos que se ha implementado su aplicación ha sido muy limitada. Dicho análisis, comúnmente, se basa en la introducción de pequeñas variaciones en los parámetros de los modelos con el objetivo de determinar si éstas influyen significativamente en el resultado del mismo, dejando al margen del análisis la referencia espacial. Ante esto, en este trabajo se hace una propuesta de AS explícitamente espacial, utilizando las herramientas disponibles en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y aplicándola en la simulación del crecimiento urbano futuro en la Comunidad de Madrid (España). En dicha simulación se tomó como base la situación de ocupación del suelo del año 2000 y se realizó una asignación óptima de suelo residencial, industrial y comercial para el año 2020, donde intervienen hasta 16 factores espaciales relacionados con aspectos ambientales, económicos y sociales. El tratamiento de la información se llevó a cabo en el SIG Idrisi Andes, utilizando un formato raster con tamaño de píxel de 50 metros. Para obtener los modelos de uso residencial, comercial e industrial se utilizó la sumatoria lineal ponderada como técnica de Evaluación MultiCriterio (EMC). Dicho modelo se tomó como referencia para hacer el AS intentando reproducir, en la medida de lo posible, el procedimiento *One-at-a-Time-Factor* (OAT). Los resultados muestran que hay un conjunto de variables que pueden incidir de manera importante en la variación de los resultados del modelo: el uso del suelo, la accesibilidad a: carreteras, zonas urbanas y comercios; la protección de suelos de mayor productividad, la accesibilidad a hospitales y la distancia ponderada por la población mas vulnerable y de mayor poder adquisitivo.

Palabras clave: Análisis de sensibilidad; simulación espacial del crecimiento urbano; Sistemas de Información Geográfica; Evaluación Multicriterio; Comunidad de Madrid.

ABSTRACT

In any model, sensitivity analysis (SA) is a fundamental process to improve the robustness and credibility of the results. However, this is something that is not very applied, at least in allocation land use models, and in the few cases that your application has been implemented has been very limited. This analysis, usually, is based in test whether selected small variations in the parameters of the model may cause important variations in the model results, leaving aside of analysis the spatial reference. Given this, the research presented here focuses on the design of an explicitly spatial SA methodology, using the tools adopted have been those available in a raster Geographic Information Systems (GIS) environment and applying on the future urban growth simulation in the region of Madrid (Spain). In this simulation is taken as reference the land cover situation in 2000 and were assigned residential, commercial and industrial optimal uses for 2020. To do so, it considered 16 spatial factors that represented environmental, economic and social aspects. The data processing was carried out in the GIS Idrisi Andes, using a raster format with pixel size of 50 meters. The simulation of residential, commercial and industrial models was developed using Weight Lineal Combination (WLC) as Multicriteria Evaluation (MCE) technique. This model is taken as reference for the AS trying to reproduce, as much as possible, the *One-at-a-Time-Factor* (OAT) analysis. The results show there are a set of variables that can significantly affect the variation of the results of the model: land use, accessibility to: roads, urban and commercial areas; protection of soils of higher productivity, accessibility to hospitals and the distance weighted by the most vulnerable population and greater purchasing power.

Key words: Sensitivity Analysis, Spatial urban growth simulation, Geographic Information Systems, Multicriteria Analysis, Madrid Region.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño y puesta en marcha de propuestas de planificación del territorio tiende a realizarse desde hace ya unos años dentro de un marco más participativo, integrando para ello a los distintos agentes implicados en el proceso, con miras a construir modelos territoriales consensuados y sostenibles a mediano o largo plazo. Por otro lado, para la elaboración de estas propuestas es cada vez más frecuente el uso de nuevas metodologías que permiten simular espacialmente una serie de posibles alternativas territoriales de futuro, útiles para tomar decisiones de planificación más informadas. Con dichas metodologías es posible combinar, en un contexto espacial, diferentes criterios económicos, sociales, ambientales, territoriales, etc., ponderados según el nivel de importancia que asignen los grupos de expertos, tomadores de decisiones, agentes sociales, etc.

En el contexto del análisis territorial, una de las técnicas más utilizadas para la simulación de diferentes procesos de planificación son las técnicas de EMC. Dichas técnicas se emplean en un entorno normativo, es decir, se utilizan para modelar situaciones deseables u óptimas, utilizando una serie de factores ponderados según el planteamiento conceptual del modelo desarrollado y el objetivo que se desea alcanzar.

No obstante, el resultado de estas simulaciones de futuro debe ser tratado con mucha cautela, ya que no es posible determinar el grado de confiabilidad de los resultados (Barredo Cano y Gómez Delgado, 2008). Lo anterior se debe a que la simulación de este tipo de modelos se realiza partiendo de una fecha reciente y bajo una serie de criterios ponderados según su nivel de importancia, de tal forma que el resultado de la simulación a futuro se intuye conceptualmente pero se desconoce espacialmente.

Ante esto, una alternativa para valorar el grado de confiabilidad en modelos de simulación espaciales de futuro es el Análisis de Sensibilidad (AS), principalmente, porque con éste se puede determinar, en cierta medida, el grado en que los resultados son afectados por pequeños cambios en los parámetros del modelo. Es decir, éste se basa en investigar si pequeñas variaciones en los parámetros de los modelos influyen significativamente en el resultado del mismo. Además, puede ayudar a simplificar la dimensión de los modelos, reducir la demanda computacional y optimizar los recursos (Saltelli *et al.*, 2000; Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005; Saltelli *et al.*, 2008).

Dicha técnica se ha venido aplicando en modelos espaciales a través de dos vías. Una, utilizando métodos numéricos o estadísticos de AS (regresiones, ANOVA, Varianza, etc.), y otra, implícitamente en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En cuanto a los primeros, existen diferentes métodos para realizar el AS (*Screening*, Locales y Globales), pero algunos autores optan o sugieren el uso de los métodos globales (*Sobol'*, *Fast* y *E-Fast*, etc.), ya que éstos permiten analizar simultáneamente todas las posibles interacciones entre las variables de entrada y los resultados del modelo de salida, a diferencia de los métodos locales (comúnmente basados en derivadas parciales), donde sólo se cuantifica el impacto local de los factores del modelo, observando el efecto que produce en los resultados la variación de cada factor de entrada individualmente (Saltelli *et al.*, 2000; Saltelli *et al.*, 1999b).

Dichas técnicas se fundamentan, básicamente, en la definición de una función de distribución de probabilidad (PDF, *Probability Distribution Function*) para cada variable de entrada del modelo, de la cual se extrae una muestra y se ejecuta el modelo un número significativo de veces, por lo general, aplicando una simulación de Monte Carlo (Saltelli *et al.*, 2000). Sin embargo, este procedimiento se hace computacionalmente más difícil, o intratable, cuando se consideran como insumos de entrada variables espaciales o temporales (Lilburne y Tarantola, 2009).

Aún así, estos métodos han sido utilizados de forma más o menos satisfactoria para la simulación de modelos hidrológicos y ambientales (Crosetto *et al.*, 2000; Crosetto y Tarantola, 2001; Wagener y Kollat, 2007; Tang *et al.*, 2007), simulación de parámetros de suelo y agricultura, y contaminación de mantos acuíferos (Lilburne y Tarantola, 2009; Varela *et al.*, 2010), en la localización óptima de depósitos de residuos peligrosos (Gómez Delgado y Tarantola, 2006). No obstante, su aplicación es limitada, pues en estos estudios no se contempla la variabilidad espacial de las variables y parámetros implicados en el modelo.

Por otro lado, el AS se ha venido aplicando, hasta cierto punto, sobre los resultados de estudios basados en la aplicación conjunta de técnicas de EMC y SIG. Hay que destacar que el uso del AS en modelos de EMC es imprescindible, puesto que dichas técnicas han sido duramente criticadas por tener un alto grado de subjetividad. Sin embargo no hay que olvidar que, recientemente, se han venido impulsando procesos de planificación

participativa, en los cuales inevitablemente se debe integrar una mezcla de información objetiva (estimaciones cuantitativas, encuestas, etc.) y subjetiva (opiniones, preferencias, juicios, etc.). De tal manera que, cuando se desarrollan modelos de simulación aplicando técnicas de EMC, se hace un gran esfuerzo por introducir tanta objetividad como sea posible en un proceso que es altamente subjetivo (Lamelas Gracia, 2009).

Por ello, la aplicación de AS en modelos desarrollados a partir de técnicas de EMC surge como una alternativa para dar un grado de confiabilidad a los resultados espaciales obtenidos de la integración de dicha información. No obstante, su aplicación hasta hoy día, al menos en modelos de asignación/simulación de usos del suelo, ha sido muy escasa y limitada, tal y como ponen de manifiesto las revisiones bibliográficas llevadas a cabo por Qureshi *et al.*, (1999) y Gómez Delgado y Bosque Sendra (2004a).

Podemos decir que en los pocos casos en los que se ha implementado, ha sido bajo un proceso de simulación *What if*, es decir, examinando los efectos que un pequeño cambio en los parámetros del modelo tiene en los resultados del mismo (Gómez Delgado y Tarantola, 2006; Gómez Delgado y Bosque Sendra, 2004a). En estos casos, los investigadores realizan cambios en el orden de preferencias asignado a cada criterio u objetivo para verificar si estas variaciones influyen en los resultados de los modelos (Qureshi *et al.*, 1999; Pettit, 2002; Chang *et al.*, 2008); otros introducen variaciones en los valores dados a los parámetros de los modelos (pesos, métrica de distancia, etc.) (Jankowski, 1995; Baja *et al.*, 2007); o aplican diferentes métodos de agregación para convertir los mapas de aptitud (píxel) en mapas de zonificación ambiental (grupo de píxeles) (Geneletti y van Duren, 2008).

Sin embargo, se encuentran ciertas limitaciones en los AS aplicados a modelos espaciales. Por un lado, es muy común cuando se aplican métodos numéricos de AS que solo se introduzcan variaciones a las PDF de los pesos, dejando los factores al margen del análisis. Por otro lado, cuando el AS se realiza sobre modelos basados en EMC, lo habitual es que sólo se varíe el orden de los criterios u objetivos, los valores de sus pesos, o se obtenga el modelo final por diferentes métodos.

En este contexto, Lilburne y Tarantola (2009) realizan una revisión de técnicas AS numéricas aplicadas a modelos espaciales, encontrando una serie de deficiencias en

dichas aplicaciones y destacando dentro de éstas, la importancia de no fundamentar el AS sólo en la variación de la distribución de los pesos, sino también introducir variaciones a la distribución de las variables (factores) de entrada. Así, dichos autores en su trabajo implementan un AS para evaluar un modelo de contaminación de los mantos acuíferos producida por la actividad agrícola en una región de Nueva Zelanda. En éste aplican una adaptación de la técnica *Sobol'* para determinar cuáles son las variables más significativas o influyentes en dicho modelo. Estos cuentan con 6 variables de carácter espacial (mapa de tipos de suelo y usos de suelo, recarga de ríos, etc.) a las cuales asignan una distribución uniforme. Para salvar la limitación que ellos detectan en los demás trabajos de AS, introducen variaciones a las variables por medio de simulaciones de Monte Carlo, opinión de expertos, etc., y con éstas, realizan el AS.

No obstante, dichos autores representan los diferentes mapas simulados en PDF y a partir de éstas realizan el AS, lo cual hace que el AS no sea explícitamente espacial. Además, este AS solo permite determinar cuáles son las variables más importantes en función de la variabilidad que se refleja en la variación de los resultados del modelo, pero sigue adoleciendo de una representación cartográfica que permita visualizar, cuantificar y evaluar espacialmente los sitios donde el impacto de dichas variables es mayor o menor. Otro aspecto del que carece este tipo de análisis aplicados a modelos de asignación de usos del suelo es el hecho de que no se considera, por ejemplo, la demanda de superficie de los usos modelados.

Ante este panorama, buscamos como objetivo principal de este trabajo desarrollar una metodología de AS explícitamente espacial, pero también que resulte fácil e intuitiva de aplicar utilizando las herramientas disponibles en un entorno SIG raster (Idrisi). Esta metodología pretende reproducir, en la medida de lo posible, el procedimiento *One-at-a-Time-Factor* (OAT). Así, se pretende obtener el impacto local de los factores en el modelo, observando el efecto que produce en los resultados la variación de cada factor de entrada y sus pesos, mientras los demás permanecen invariables.

Asimismo, se realizará también un AS aplicando el método *Extended Fourier Amplitude Sensitivity (E-FAST)*, utilizando para ello el programa *SimLab*¹. La finalidad

¹ Software del *Institute for Systems, Informatics, and Safety of the Joint Research Centre* de la Unión Europea. Para ampliar las descripciones teóricas y prácticas sobre las metodologías de análisis de sensibilidad y el funcionamiento del software *SimLab* se pueden consultar los libros: *Sensitivity Analysis* de Saltelli, Chan y Scout (2000) y *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio* de Gómez Delgado y Barredo Cano (2005).

de aplicar también esta técnica es comparar y comprobar, en cierta medida, los resultados obtenidos en la metodología propuesta.

Dichas metodologías se aplicarán a un modelo de simulación del crecimiento urbano futuro en la Comunidad de Madrid. En éste se consideran como variables de entrada hasta 16 factores espaciales (Tabla 1). Para la simulación se utilizó como técnica de EMC a la Sumatoria Lineal Ponderada. Con el AS se pretende determinar la estabilidad/robustez de los resultados del modelo.

2. ÁREA DE ESTUDIO, MODELO DE CRECIMIENTO URBANO Y DATOS

2.1. Descripción del área de estudio

La región de Madrid ha vivido durante los últimos 10-15 años un proceso de rápida urbanización (zonas en gris de la Figura 1), que se ha traducido, principalmente, en una ocupación del territorio a base de urbanizaciones residenciales con patrones difusos (EEA, 2006). Dicho proceso se confirma con el hecho de que aproximadamente 50.000 Ha se han convertido en superficies artificiales entre 1990 y 2000, es decir casi un 50% más de la superficie existente en 1990 (Aldana, 2005; OSE, 2006; Plata Rocha *et al.*, 2009).

En algunos estudios previos se ha demostrado que existe una cantidad considerable de factores que impulsan el crecimiento urbano en la región. Dentro de éstos se puede mencionar la demanda de áreas residenciales como una necesidad de la población, por un lado, y por otro, debido al boom inmobiliario basado en la especulación y al importante desarrollo económico experimentado en años recientes. Asimismo, la mejora y el incremento de las infraestructuras (carreteras, líneas de trenes y metro, etc.) han sido determinantes en la expansión de las zonas urbanas, de tal forma que éstas han proliferado, incluso, en lugares de baja densidad de población (Serrano Cambronero *et al.*, 2002; López de Lucio, 2003). En este sentido, los lugares de mejor accesibilidad a carreteras son muy demandados por los promotores inmobiliarios y, principalmente, los más próximos a las intersecciones de las principales autovías, donde generalmente se localizan las grandes superficies comerciales y de ocio (Gago García *et al.*, 2004; Santiago Rodríguez, 2007). Asimismo, en la localización de las zonas urbanas en la Comunidad de Madrid han influido factores de tipo ambiental, económico, de ordenación urbana, demográficos, etc., tales como: la geotecnia, los tipos y usos de

suelo, pendiente, la disponibilidad de suelo urbanizable, entre otros. Por último, y no por ello menos importantes, están aquellas fuerzas conductoras de carácter social, es decir, factores como la confortabilidad de las viviendas (Ej. orientación del terreno), la calidad visual, la accesibilidad a los servicios básicos, la lejanía a instalaciones peligrosas, etc. (Plata *et al.*, En revisión 1).

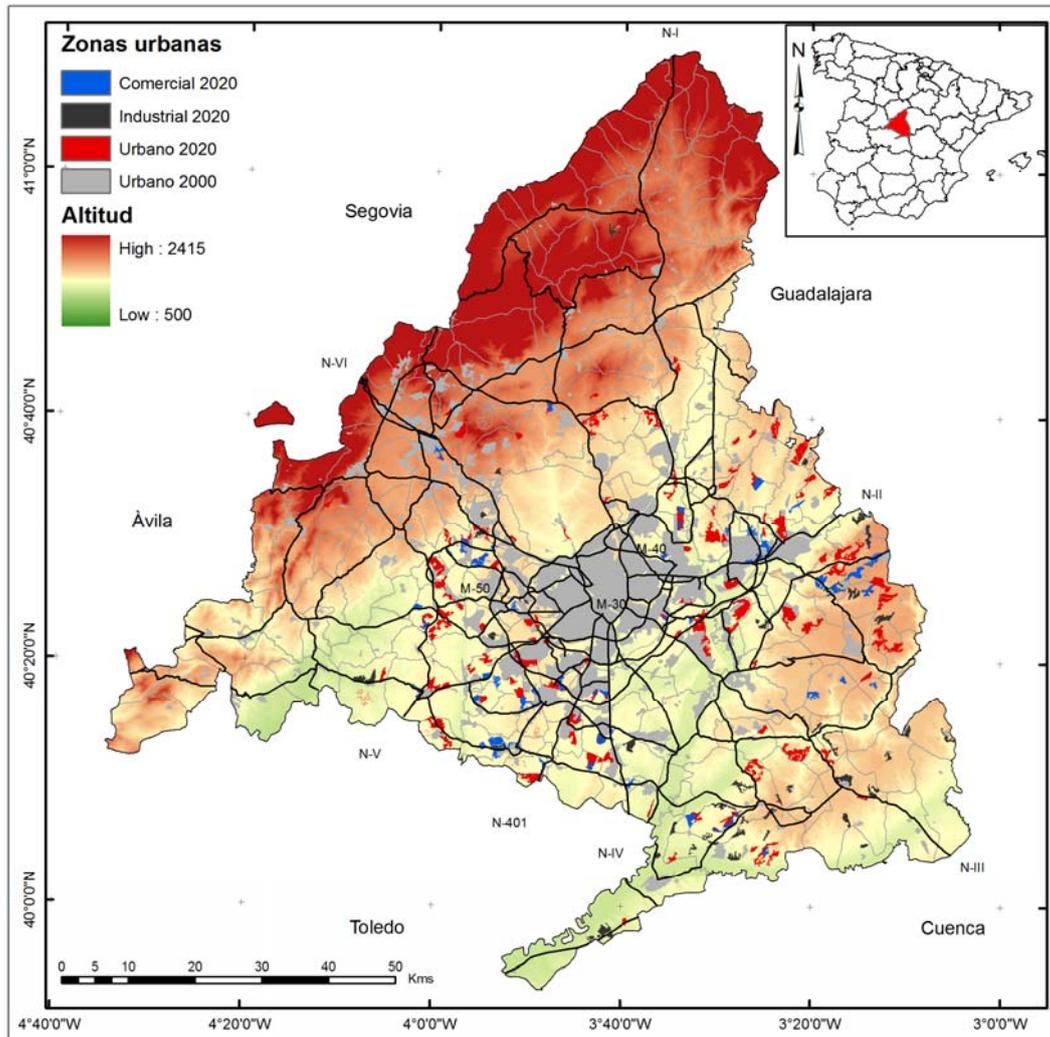


Figura 1. Área de estudio

Fuente. Elaboración propia a partir del CLC1990 y 2000. Instituto Geográfico Nacional, España

Por tanto, para intentar simular o reproducir este fenómeno a mediano o largo plazo, se necesita un número de variables espaciales considerable, donde los resultados obtenidos podrían ser muy discutidos. No obstante, la aplicación de un análisis de sensibilidad podría dar robustez a los resultados de la simulación.

2.2. Modelo de crecimiento urbano y datos

Previo a este trabajo se ha desarrollado un modelo de asignación del crecimiento urbano futuro para la Comunidad Autónoma de Madrid, España (Plata *et al.*, 2010; Plata *et al.*, en revisión 2) y sobre el cual se llevará a cabo un análisis de sensibilidad.

Para la implementación del modelo se tomó de base la situación de ocupación del suelo del año 2000 y se realizó una asignación óptima de suelo residencial, industrial y comercial al año 2020 (Figura 2), en la que intervinieron hasta 16 factores relacionados con aspectos ambientales, económicos y sociales, normalizados entre 0 y 255 y ponderados según su nivel de importancia para este fin (Tabla 1). Para generar dichos factores se utilizaron un conjunto de variables espaciales, tales como: uso del suelo (*Corine Land Cover* 2000), tipos de suelo, hidrografía, vías de comunicación, espacios naturales protegidos (Red Natura 2000), vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos, geotecnia, instalaciones no deseables, equipamientos, altitud, pendiente y orientación del terreno, población y delimitaciones administrativas. Dicha información se extrajo de diferentes fuentes (Instituto Geográfico Nacional, Instituto Geológico y Minero, Consejería de Agricultura y Servicio de Cartografía Regional de la Comunidad de Madrid, Departamento de Estadística de la Consejería de Economía de la Comunidad de Madrid, Departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá de Henares, entre otras). Así, utilizando dicha información se extrajeron hasta 15 factores y otras tantas restricciones.

El tratamiento de la información se llevó a cabo en el SIG Idrisi Andes, utilizando un formato raster con tamaño de píxel de 50 metros.

Para la integración de los factores y sus pesos correspondientes se utilizó la sumatoria lineal ponderada (Ec. 1), con la cual se obtuvieron los mapas de aptitud (residencial, comercial e industrial).

$$M_{\text{asignacion}} = (w_1 \cdot X_1 + w_2 \cdot X_3 + \dots + w_n \cdot X_n) \cdot M_R \quad 1$$

Donde: $M_{APTITUD}$ es el mapa que representa el nivel de aptitud de cada píxel para ser urbanizado; w_i es el peso aplicado a cada factor X_i .

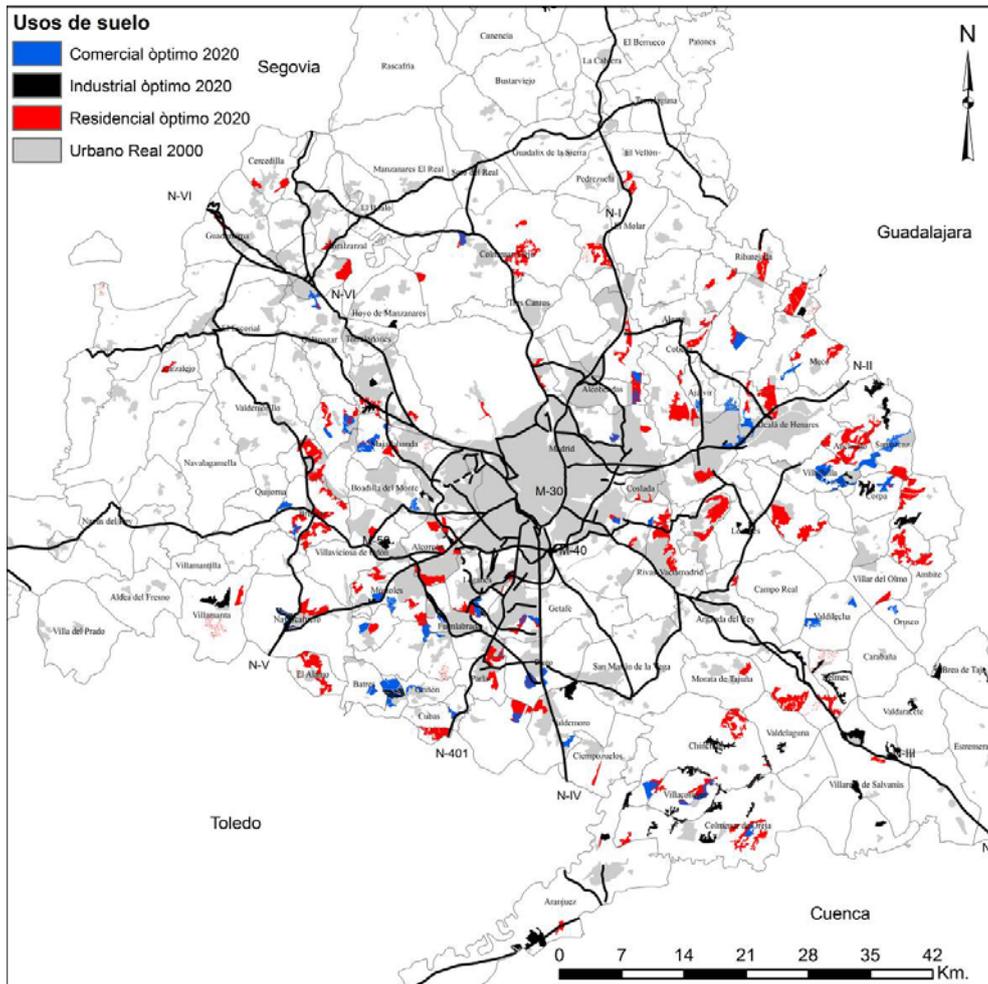


Figura 2. Modelo de simulación del crecimiento urbano del año 2000 al 2020 en la Comunidad Autónoma de Madrid

Fuente. Elaboración propia a partir del CLC2000. Instituto Geográfico Nacional, España

Asimismo, fue necesario establecer una demanda de superficie para cada uso para el año 2020. Dicha demanda se obtuvo de manera externa utilizando un modelo de Dinámica de Sistemas. Para ello se diseñó y ajustó un modelo que relaciona diferentes variables socioeconómicas y demográficas entre sí, interactuando además con el crecimiento de la superficie residencial y productiva (Aguilera Benavente *et al.*, 2009).

Posteriormente, a partir de los mapas de aptitud, se generaron mapas con las parcelas más adecuadas para cada uso, aplicando un procedimiento de parcelación por intervalos (Franco Mass y Bosque Sendra, 1997). En dicho procedimiento es necesario establecer

un nivel mínimo de aptitud, así como el tamaño mínimo y máximo de las parcelas, y la demanda de superficie para cada uso (Tabla 2).

Tabla 1. Factores utilizados en el modelo de crecimiento urbano para el año 2020 en la Comunidad de Madrid (Plata *et al.*, 2010). Pesos y tipo de distribución de cada factor

| Criterio | No. | Factores | Pesos (distribución uniforme) | | | Distribución |
|---------------|-----|--|-------------------------------|-----------|------------|--------------|
| | | | Residencial | Comercial | Industrial | |
| Ambiental | 1 | Usos del suelo (CLC1990). En este factor se les da menores valores de adecuación a los usos con cierto valor ambiental y productivo (agrícolas, pastizales, bosques, entre otros). | 0,14 | 0,12 | 0,21 | D |
| | 2 | Lejanía a hidrografía. En este factor poseen una menor adecuación los sitios más próximos a la red hidrográfica. | 0,07 | 0,06 | 0,10 | E |
| | 3 | Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos. En este factor la mayor adecuación se asigna a formaciones con la menor permeabilidad. | 0,03 | 0,02 | 0,04 | D |
| | 4 | Lejanía a espacios naturales. Con este factor se considera una mayor adecuación a las zonas más alejadas de los espacios naturales existentes. | 0,05 | 0,04 | 0,08 | G |
| | 5 | Protección de suelos de mayor productividad. Las mayores adecuaciones corresponden a suelos de peor calidad y menos desarrollados. | 0,07 | 0,06 | 0,10 | D |
| Económico | 6 | Pendiente. Los sitios con pendientes más suaves tienen las mayores adecuaciones. | 0,02 | 0,02 | 0,02 | U |
| | 7 | Accesibilidad a carreteras. Los lugares más próximos a las carreteras poseen la mayor adecuación. | 0,12 | 0,17 | 0,11 | B |
| | 8 | Accesibilidad a zonas urbanas. Las mayores adecuaciones son asignadas a los lugares más próximos a las ciudades medias e intermedias. | 0,16 | 0,14 | 0,08 | B |
| | 9 | Accesibilidad a comercios. Para el modelo de zonas residenciales se asigna la mayor adecuación a las zonas más próximas a las zonas comerciales. Mientras que para el modelo de zonas comerciales se da mayor adecuación a las áreas localizadas entre 2 y 10 kilómetros de un centro comercial preexistente. | 0,09 | 0,11 | ---- | B |
| | 10 | Accesibilidad a industrias. En este factor tienen mayor adecuación las zonas más próximas a las industrias. | ---- | ---- | 0,05 | B |
| | 11 | Geotecnia. La menor adecuación se otorga a las zonas donde exista riesgo de fallas activas, riesgo sísmico o sitios de baja estabilidad geomorfológica. | 0,06 | 0,05 | 0,05 | D |
| Social | 12 | Lejanía a instalaciones no deseables. Los mayores valores de adecuación se otorgan a los sitios más alejados de dichas instalaciones. | 0,02 | 0,06 | 0,05 | E |
| | 13 | Accesibilidad a hospitales. Este factor valora con mayor adecuación a los lugares más cercanos a los centros sanitarios. | 0,10 | 0,05 | 0,03 | T |
| | 14 | Distancia (ponderada) a la población. Para las zonas comerciales se da mayor adecuación a los sectores urbanos que tienen mas población con poder adquisitivo y para las zonas industriales se asigna menos adecuación a los sectores urbanos con población más vulnerable. | ---- | 0,07 | 0,08 | T |
| | 15 | Cuencas Visuales. En este factor se asignan mayores valores de adecuación a los lugares ubicados más próximos a espacios naturales protegidos, humedales y bosques. | 0,02 | 0,02 | ---- | D |
| | 16 | Orientación del terreno. Los terrenos con una orientación Sur –Sureste serían los más adecuados desde el punto de vista de la confortabilidad climática. | 0,05 | 0,01 | ---- | U |
| Restricciones | | Restricciones utilizadas. Superficies artificiales del año 2000 (zonas urbanas, carreteras, etc.), hidrografía y las zonas no urbanizables establecidas en la zonificación legal vigente. | | | | |

Distribuciones: D – Discreta; E – Exponencial; G – Gamma; U – Uniforme; B – Beta; T - Triangular

Finalmente, con los mapas de parcelas adecuadas para los usos residencial, comercial e industrial se aplicó una asignación multiobjetivo (comando MOLA de IDRISI), para resolver posibles conflictos de asignación entre los 3 usos.

Como resultado se obtiene un modelo de asignación de crecimiento urbano para el año 2020 (Figura 2) que presenta una compacidad en las nuevas manchas artificiales, característica que, en principio, otorga cierta sostenibilidad al modelo de desarrollo urbano.

Resumiendo podemos decir que el modelo localiza las nuevas áreas residenciales en las cercanías de los núcleos urbanos de tamaño intermedio (evitando así tanto la ineficacia de la dispersión como la excesiva concentración), cercanos a las carreteras (maximizando su accesibilidad) y en general en usos de suelo de baja productividad (evitando el consumo de suelo de alto valor productivo). Del mismo modo, las zonas comerciales resultan distribuidas en lugares cercanos a las nuevas zonas urbanas y a distancias considerables entre ellas. Por su parte, las nuevas zonas industriales están localizadas en lugares próximos a carreteras y en zonas con menor densidad de población.

Tabla 2. Parámetros utilizados en el modelo de 2000 al 2020

| Uso urbano | Demanda | | Aptitud mínima de las parcelas | Superficie mínima y máxima de las parcelas |
|-------------|-----------|---------|--------------------------------|--|
| | Hectáreas | Píxeles | | |
| Residencial | 17.618 | 70.472 | 160 | 50 – 500 has. |
| Comercial | 5.418 | 21.672 | 170 | 50 – 250 has. |
| Industrial | 5.418 | 21.672 | 150 | 50 – 250 has. |

Fuente: Aguilera *et al.*, 2009; Plata *et al.*, 2010.

3. METODOLOGÍA

Como ya se comentó, en este trabajo se realizará un AS del modelo de simulación del crecimiento urbano explicado en el apartado 2.2. Dicho AS se desarrollará bajo los 3 apartados metodológicos esquematizados en la figura 3. En el primer apartado (3.1) se realiza un AS aplicando el método E-FAST, en el segundo (3.2) se hace la propuesta de AS explícitamente espacial, y en el tercero (3.3) se hace una integración de ambos, con la finalidad de paliar algunas de las deficiencias del primero (3.1). Asimismo, se intentará determinar si existe una relación entre los resultados obtenidos con los estadísticos utilizados en la técnica E-FAST y en el AS explícitamente espacial para determinar los factores más influyentes en el modelo.

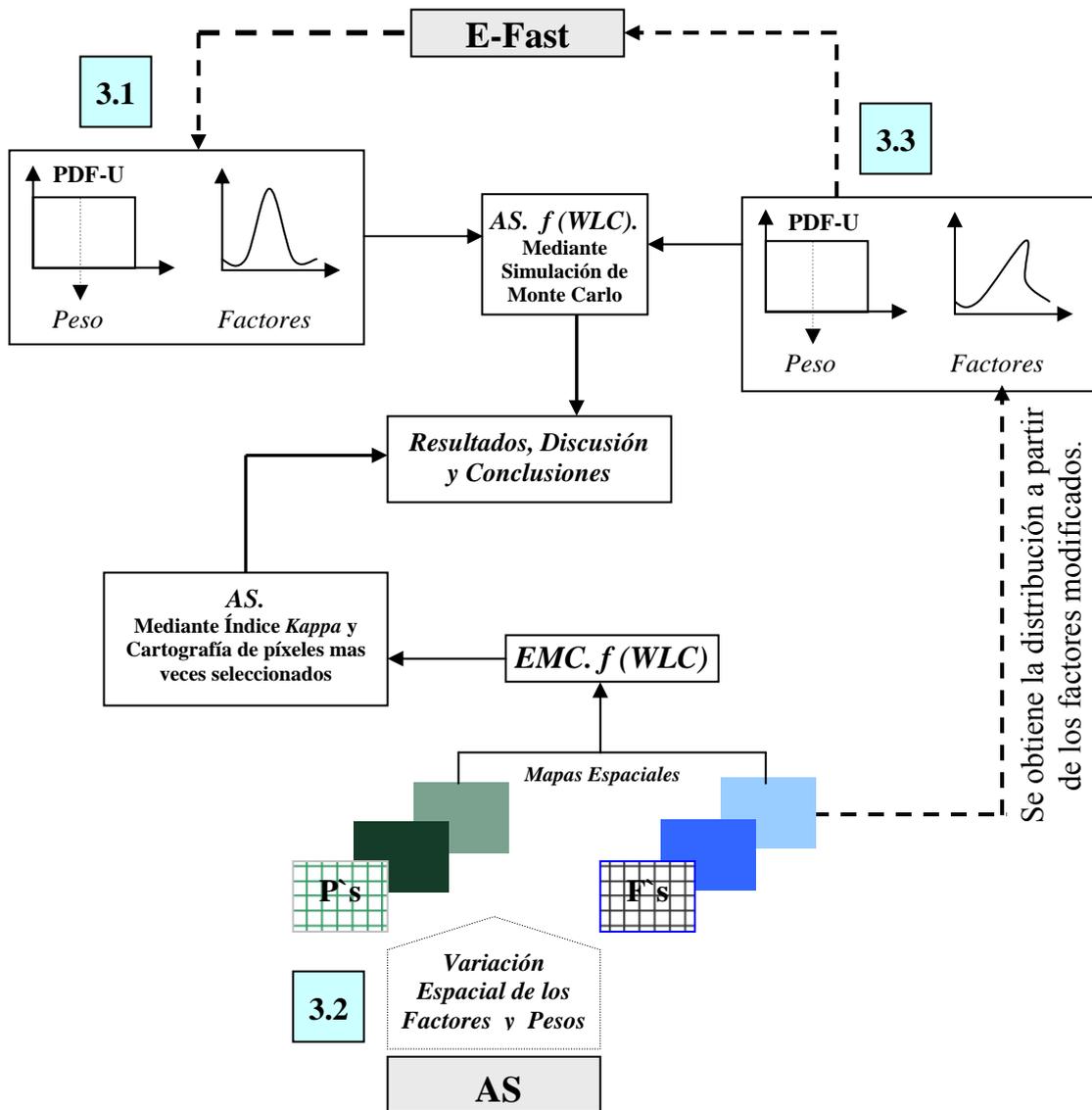


Figura 3. Esquema metodológico para llevar a cabo el AS. El análisis 3.1 está basado en el método E-FAST. El 3.2 es la propuesta de AS explícitamente espacial realizada en este trabajo. Por su parte en el análisis 3.3 se integran en cierto modo las metodologías anteriores.

3.1. Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test (E-FAST)

Esta técnica fue desarrollada por Saltelli *et al.*, (1999a) partiendo de los fundamentos teóricos y matemáticos del método FAST propuesto por Cukier *et al.*, (1973). Dicha técnica está considerada dentro de aquellas basadas en la estimación de la varianza. Con la aplicación de ésta se pueden obtener índices de sensibilidad de primer orden y de efecto total, para lo cual se emplea una simulación de Monte Carlo bajo un muestreo, teniendo en cuenta k factores de entrada independientes y un número N de muestras.

Para un factor de entrada X_i , el índice de sensibilidad representa la contribución fraccional a la varianza del modelo de salida Y , que se debe a X_i . Para calcular los índices de sensibilidad, la varianza total V del modelo de salida Y se distribuye a todos los factores de entrada X_i , es decir, ésta se descompone como una suma de los términos de dimensionalidad creciente:

$$V = \sum_i V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \sum_{i < j < m} V_{ijm} + \dots + V_{1,2,\dots,k}$$

Donde:

$$V = V[E(Y | X_i = x_i^*)] \quad y$$

$$V_{ij} = V[E(Y | X_i = x_i^*, X_j = x_j^*)] - V[E(Y | X_i = x_i^*)] - V[E(Y | X_j = x_j^*)]$$

$E(Y | X_i = x_i^*)$ es la esperanza matemática de Y condicionado a un valor fijo de X_i , y $V(\cdot)$ es la varianza condicional.

El índice de sensibilidad de primer orden S_i para el factor o variable X_i es definido como:

$$S_i = \frac{V_i}{V}$$

El cual representa la parte de la variación de Y que es explicada por X_i individualmente. La aportación más importante del E-FAST es que proporciona, para cada X_i , estimaciones de sensibilidad de primer orden S_i y estimación de un índice de sensibilidad total S_{Ti} , definido como la suma de todos los índices (S_i y órdenes mayores) donde es incluida X_i , de tal forma que se concentra en un solo término todos los posibles efectos de interacciones que pueden estar implicados en el modelo. Con la estimación de S_i y S_{Ti} se puede apreciar la diferencia entre el impacto del factor X_i solo en Y , medido por S_i y el impacto total del factor X_i debido a las interacciones con otros factores en el modelo Y , medido por S_{Ti} .

La técnica E-Fast, y otras, están implementadas en el Software SimLab, utilizado para llevar a cabo el AS bajo el siguiente procedimiento:

- I. Se establece la distribución de frecuencias de los factores (Tabla 1). En el caso de los pesos se asignó una distribución uniforme con una variación de $\pm 25\%$ de su valor nominal;
- II. Se extrae una muestra de los distintos factores del modelo (factores propiamente dichos y pesos otorgados a los mismos) y se ejecuta el modelo un número significativo de veces (4.941 ejecuciones, en nuestro caso);
- III. Finalmente se analizan los valores alcanzados en los índices de sensibilidad de los factores de entrada del modelo.

3.2. Metodología de AS explícitamente espacial

La metodología anterior tiene el inconveniente de que no trabaja a nivel espacial, sino a través de la distribución de frecuencias de probabilidades (PDF) de las variables del modelo. Además, en dicho AS sólo se modifican los pesos de los modelos pero no los factores de entrada. Por tal motivo, proponemos una alternativa de AS explícitamente espacial, utilizando las herramientas disponibles en un SIG raster convencional (concretamente Idrisi Andes), e intentando reproducir, en la medida de lo posible, el procedimiento OAT.

Esta propuesta metodológica se basa en la introducción de un cierto porcentaje de variación ($\pm 25\%$, para este caso) de forma aleatoria en los valores de adecuación de los factores espaciales y en los pesos rasterizados a nivel de píxel (originalmente un valor nominal). Para llevar a cabo este proceso es necesario seguir los pasos representados en la figura 4.

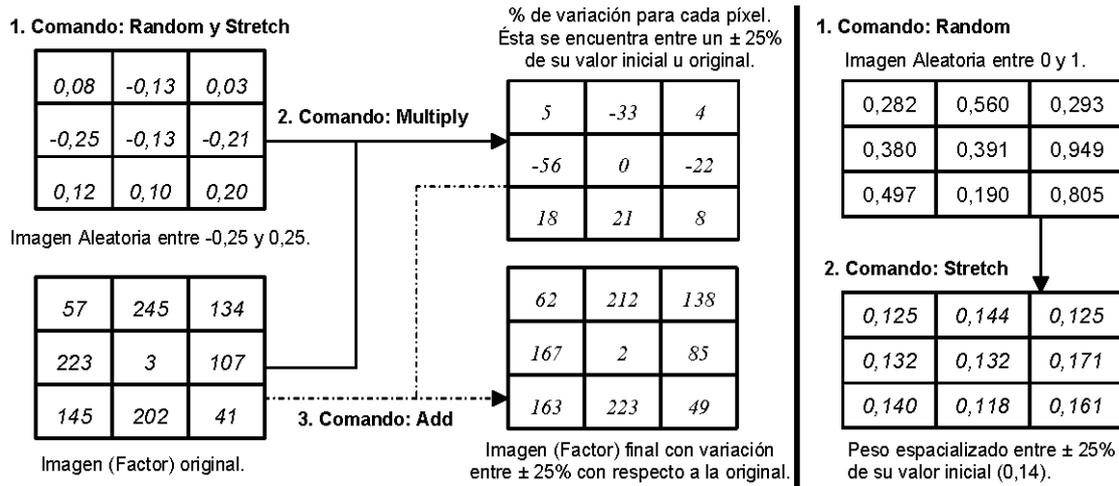


Figura 4. Proceso para obtener la variación espacial en los factores (Izq.) y pesos (Der.)

En dicho esquema el procedimiento seguido para obtener los factores con variación espacial (izquierda) es el siguiente: primero se generó una muestra aleatoria entre -0,25 y +0,25 (1. *Random y Stretch*) (mapa raster); posteriormente se multiplica (2. *Multiply*) este mapa por el factor que deseamos modificar, obteniendo un segundo mapa raster con la variación aleatoria entre $\pm 0,25$ del valor de adecuación del factor; y por último, dicho mapa se suma (3. *Add*) al factor original obteniéndose el factor con una variación entre $\pm 25\%$ de su valor de adecuación original a nivel de píxel. Por su parte, el proceso seguido para la rasterización de los pesos (derecha) se hizo de la siguiente forma: primero se generó una imagen aleatoria entre 0 y 1 (1. *Random*); y posteriormente, dicha imagen se contrae entre $\pm 25\%$ del valor del peso correspondiente (2. *Stretch*). Por ejemplo, para un peso de 0,14, los píxeles de la imagen tomarían valores entre 0,105 y 0,175.

Una vez obtenidos todos los factores y pesos con variación espacial, se utilizaron como insumo para generar una serie de mapas de aptitud para uso residencial, comercial e industrial, aplicando la sumatoria lineal ponderada (EC. 1). Para ello se utilizó un procedimiento del tipo *One-at-a-Time-Factor* (OAT), es decir, se ejecutaron los modelos introduciendo cada vez un factor y su correspondiente peso modificados (variación espacial de $\pm 25\%$) y manteniendo los demás en su estado original. Para la simulación de cada modelo se consideraron los mismos parámetros introducidos en el modelo original (Tabla 2). De este modo, se obtuvieron tantos mapas de aptitud como factores tenía cada modelo (14 para residencial; 15 para comercial; 13 para industrial).

A partir de dichos mapas de aptitud se hicieron tres análisis diferentes, con la finalidad de obtener la mayor información posible sobre el impacto de los factores y pesos modificados en los resultados del modelo, así como determinar el grado de robustez del modelo planteado.

a). *Cuantificación del impacto local de cada factor en el modelo para cada uso individual*

Para llevar acabo este análisis fue necesario reclasificar los mapas de aptitud (continuos) en mapas binarios, considerando que el total de píxeles reclasificados es igual a la demanda de superficie requerida en cada uso (Tabla 2). Posteriormente, se utilizó el estadístico *Kappa* para establecer el nivel de acuerdo o desacuerdo entre dichos mapas binarios y su similar obtenido con los factores y pesos originales.

De esta forma, a partir de los valores del estadístico K_R , y considerando la clasificación propuesta por Landis y Koch (1977), se determina el grado de influencia de cada factor y su correspondiente peso en los modelos ejecutados (Tabla 3).

Tabla 3. Escala de valoración del índice K_R

| Clasificación K_R | Acuerdo | Desacuerdo |
|------------------------|----------------|------------------|
| 1-0,81 | Casi perfecto | No significativo |
| 0,80-0,61 | Sustancial | Mediano (Menor) |
| 0,60-0,41 | Moderado | Moderado |
| 0,40-0,21 | Mediano | Sustancial |
| 0,20-0 | Insignificante | Casi Total |

Fuente: Landis y Koch, 1977.

b). *Cartografía del número de veces que los píxeles son reiteradamente seleccionados en los modelos ejecutados*

Para este fin se ejecutaron 16 modelos de asignación óptima multiobjetivo, partiendo de los mapas de aptitud para los usos residencial, comercial e industrial obtenidos con los factores y pesos modificados, y aplicando los mismos criterios establecidos en el modelo original (Tabla 2). A partir de estos modelos, se elaboró la cartografía de píxeles más veces seleccionados en las 16 ejecuciones (suma de todos los modelos), y se extrajo el porcentaje de coincidencias que presentaba con el modelo original (ilustrado en la Figura 1). Este tipo de cartografía es una de las técnicas más utilizadas para determinar la robustez de modelos espaciales (Lodwick, 1989; Brundsen *et al.*, 1990; Lowry *et*

al., 1995; Canters *et al.*, 2002; Gómez Delgado y Bosque Sendra, 2004b; Gómez Delgado y Bosque Sendra, 2009).

c). *Diferencia media cuadrática entre el modelo original y los modelos ejecutados con los factores y pesos modificados*

Dicho análisis consistió en determinar la diferencia existente entre los mapas de aptitud ejecutados con los factores y pesos modificados respecto a los originales, aplicando la expresión habitualmente utilizada para el cálculo del error medio cuadrático (Gómez Delgado y Bosque Sendra, 2004b; Gómez Delgado y Bosque Sendra, 2009):

$$M_J = \sqrt{\frac{\sum_i (X_{it} - X_i)^2}{n-1}}$$

Donde: X_i es el mapa de aptitud obtenido en cada uno de los modelos ejecutados con los factores y pesos modificados, X_{it} es el mapa de aptitud obtenido en el modelo original, n es el número de modelos ejecutados y M_J es el mapa que muestra el error medio cuadrático por píxel para el uso J (en nuestro caso 3 mapas, uno para cada uso).

Como resultado se obtendrá un mapa para cada uso de suelo simulado que mostrará espacialmente los sitios donde el efecto de variación de los factores y pesos es mayor o menor. Asimismo, se podrá determinar algunos estadísticos básicos sobre este resultado (media, desviación estándar, mínimo y máximo, etc.).

3.3. Integración del AS espacial y el método E-Fast

En esta fase metodológica se intentan integrar las 2 metodologías anteriores. Como se comentó anteriormente, cuando se aplica el método E-FAST (3.1) solo se introducen variaciones en la PDF de los pesos, sin modificar la de las variables de entrada, en este caso los factores del modelo. Para salvar esta limitación, en este apartado aplicaremos nuevamente el método E-FAST, pero utilizando las PDF de las variables con variaciones espaciales obtenidas en la sección anterior. De este modo, ahora el AS se aplica introduciendo una variación del $\pm 25\%$, tanto en los factores como en los pesos, en cierto modo, siguiendo el razonamiento propuesto por Lilburne y Tarantola, (2009). El resto del procedimiento seguido para el AS es el mismo que se aplicó en el apartado 3.1.

Finalmente, para analizar los resultados obtenidos con el método *E-FAST* se utilizan los índices de sensibilidad S_i y S_{Ti} , y en el AS espacial se utilizó el estadístico *Kappa*. Los primeros miden la cantidad de varianza del modelo de salida Y que es explicada por los factores X_i , y el segundo establece el nivel de acuerdo o desacuerdo entre dos mapas binarios. Ambos estadísticos miden aspectos diferentes, por lo tanto, determinar la relación entre éstos sería de gran utilidad para establecer las sinergias entre las metodologías aplicadas y los resultados obtenidos.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados del AS aplicando el método E-Fast (3.1 y 3.3)

Ambos procedimientos se llevaron a cabo utilizando el Software SimLab. Como ya mencionamos, el primer análisis (3.1) se basa en la distribución de frecuencias de los factores originales. Para el caso de los pesos se asignó una distribución de frecuencias uniforme con un rango entre ± 25 % de su valor nominal (para ver la distribución asignada a cada variable ir a la tabla 1).

Según se deriva de los resultados mostrados en la tabla 4, es el factor usos del suelo al que se le adjudicaría la mayor proporción de variabilidad de los resultados (un 0,24 y un 0,17 en el caso de zonas residenciales y comerciales, y hasta un 0,48 para las zonas industriales). Esto quiere decir que cualquier pequeña variación realizada en este factor, provocará modificaciones relativamente importantes en los resultados del modelo. Asimismo, se puede observar que otros 4 factores acumulan una cierta cantidad de variabilidad, tal es el caso de: la accesibilidad a zonas urbanas para el modelo de zonas residenciales (0,14) y para el modelo de zonas comerciales (0,12); la accesibilidad a comercios para el modelo de zonas comerciales (0,15); el factor de protección de suelos de mayor productividad para el modelo de zonas industriales (0,13); y la geotecnia para el modelo de zonas residenciales (0,09). En este caso se cumple la máxima habitual en casi todos los modelos, es decir, que tan sólo tres o cuatro factores son los verdaderamente influyentes en los resultados. Sin embargo, lo peculiar de este caso es que la proporción que suman todos ellos (los mas importantes) es relativamente escasa respecto a lo habitual en otros modelos (Crosetto *et al.*, 2001; Crosetto *et al.*, 2002; Gómez Delgado y Tarantola, 2006). Al no aglutinar una cantidad sustanciosa de la variabilidad de los resultados, resulta difícil y poco aconsejable utilizar esta información

para simplificar el modelo. Destacar el hecho de que los resultados muestran que no existen interacciones significativas entre los factores, lo cual se muestra con la semejanza que presentan los índices de primer orden y los índices de efecto total (S_i y S_{Ti}). En casos prácticos, si la diferencia entre ambos índices es mayor a 0,2 se considera significativa (Gomez Delgado y Tarantola, 2006, Saltelli *et al.*, 2008).

Tabla 4. Factores que resultaron más significativos en el AS introduciendo variaciones de $\pm 25\%$ solo en los pesos.

| Factores | Factores | Residencial | | Comercial | | Industrial | |
|--|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | S_i | S_{Ti} | S_i | S_{Ti} | S_i | S_{Ti} |
| 1. Uso del suelo (CLC1990) | F1 | 0,24 | 0,24 | 0,17 | 0,17 | 0,48 | 0,48 |
| 5. Protección de suelos de mayor productividad | F5 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,13 | 0,13 |
| 8. Accesibilidad a zonas urbanas | F8 | 0,14 | 0,14 | 0,12 | 0,12 | | |
| 9. Accesibilidad a comercios | F9 | 0,06 | 0,06 | 0,15 | 0,15 | | |
| 11. Geotecnia | F11 | 0,09 | 0,09 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | 0,04 |
| 13. Accesibilidad a hospitales | F13 | 0,05 | 0,05 | | | | |
| 16. Orientación del terreno | F16 | 0,07 | 0,07 | | | | |

Como se ha venido comentando, en este análisis (3.1) solo se introducen variaciones en los pesos. Para solventar esta limitación decidimos utilizar los factores con variación espacial obtenidos en el apartado 3.2 y de éstos extraer sus PDF. A partir de aquí se procedió a aplicar nuevamente el método E-Fast (aquí se integra el AS espacial y el E-FAST, metodología desarrollada en el apartado 3.3).

Según los resultados mostrados en la tabla 5, se deriva que al menos 9 variables recogen una cantidad importante de variabilidad en los modelos. En el caso del modelo para zonas residenciales destaca la accesibilidad a zonas urbanas (0,33), la accesibilidad a comercios (0,22), el factor de protección de suelos de mayor productividad (0,19), el factor uso de suelo (0,10) o la accesibilidad a carreteras y geotecnia (0,09). Por su parte, el modelo para las zonas comerciales nos muestra que los factores más significativos son la accesibilidad a comercios (0,57), la accesibilidad a carreteras (0,29), los usos del suelo (0,21) y la accesibilidad a zonas urbanas (0,15). Por último, el resultado obtenido para las zonas industriales nos muestra que sigue siendo el factor usos de suelo el que tiene la mayor importancia (0,58), seguido a considerable distancia por otros cuatro factores: protección de suelos de mayor productividad (0,16), lejanía a espacios naturales e hidrografía (0,15 y 0,13, respectivamente) y accesibilidad a carreteras (0,09).

Los resultados muestran que al introducir variaciones, tanto en los factores como en los pesos, se obtienen 4 factores significativos adicionales al primer análisis. Asimismo, la diferencia entre los índices de primer orden y los de efecto total (S_i y S_{Ti}) muestran que existe cierta interacción entre los factores, aunque la diferencia entre éstos no es significativa ($< 0,2$).

Tabla 5. Factores que resultaron más significativos en el AS introduciendo variaciones de $\pm 25\%$ tanto en los factores como en los pesos.

| Nombre de los Factores | Factores | Residencial | | Comercial | | Industrial | |
|--|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | S_i | S_{Ti} | S_i | S_{Ti} | S_i | S_{Ti} |
| 1. Uso del suelo (CLC1990) | F1 | 0,10 | 0,11 | 0,21 | 0,23 | 0,58 | 0,62 |
| 2. Lejanía a hidrografía | F2 | | | | | 0,13 | 0,22 |
| 4. Lejanía a espacios naturales | F4 | | | | | 0,15 | 0,18 |
| 5. Protección de suelos de mayor productividad | F5 | 0,19 | 0,27 | | | 0,16 | 0,20 |
| 7. Accesibilidad a carreteras | F7 | 0,09 | 0,15 | 0,29 | 0,34 | 0,09 | 0,13 |
| 8. Accesibilidad a zonas urbanas | F8 | 0,33 | 0,40 | 0,15 | 0,18 | | |
| 9. Accesibilidad a comercios | F9 | 0,22 | 0,25 | 0,57 | 0,66 | | |
| 11. Geotecnia | F11 | 0,09 | 0,14 | | | | |

4.2. Resultados del AS explícitamente espacial

Tal y como se explicó en el apartado 3.3, en este análisis se aplicó la sumatoria lineal ponderada (Ec. 1) para generar, en primer lugar, los mapas de aptitud para los usos residencial, comercial e industrial. Posteriormente, dichos mapas se reclasificaron para obtener mapas binarios para cada uso. Una vez obtenidos dichos mapas (14 para residencial; 15 para comercial; 13 para industrial) se verificó el nivel de acuerdo que presentaba cada uno con respecto a los obtenidos en el modelo con los factores y pesos iniciales (sin variación). Dicho acuerdo se cuantificó con el estadístico Kappa (K_R) siguiendo la clasificación planteada por Landis y Koch (1977) (ver Tabla 3).

Los resultados obtenidos revelan que en total hasta 18 modelos (de los 42 ejecutados), donde se introducen factores y pesos con variaciones espaciales, presentan niveles de acuerdo inferiores a 0,81 con respecto al modelo ejecutado con los factores y pesos iniciales (sin variación) (Tabla 6).

Así, podemos señalar al factor uso del suelo (0,34) para el modelo de zonas industriales y a la accesibilidad a carreteras (0,35) para el modelo de zonas comerciales influyen de manera sustancial en los resultados de dichos modelos ($K_R < 0,40$). Seguidos de éstos, la accesibilidad a zonas urbanas (0,43), el factor uso del suelo (0,45) y la accesibilidad a

comercios (0,48) presentan un grado de desacuerdo moderado (K_R entre 0,60 y 0,41) en los modelos generados para las zonas comerciales, así como la accesibilidad a carreteras (0,56) para el modelo de zonas industriales. Mientras que los factores de accesibilidad a zonas urbanas (0,64), uso del suelo (0,65), accesibilidad a carreteras (0,70), accesibilidad a hospitales (0,76) y accesibilidad a comercios (0,78) presentan un grado de influencia menor (K_R entre 0,80 y 0,61) en los resultados de los modelos para zonas residenciales. Del mismo modo, los factores de accesibilidad a hospitales (0,75), geotecnia (0,77) y la distancia ponderada a la población con mayor poder adquisitivo (0,79), para los modelos de zonas comerciales, y el factor de protección de suelos de mayor productividad (0,69), la accesibilidad a zonas urbanas (0,70), la distancia ponderada a la población más vulnerable (0,74) y la accesibilidad a industrias (0,80), para el modelo de zonas industriales, también presentan un nivel de influencia menor. En todos los demás casos podríamos decir que los factores no influyen de manera significativa en los resultados del modelo (K_R entre 1 y 0,81).

Tabla 6. Resultado del AS explícitamente espacial con variaciones de $\pm 25\%$ en los factores y pesos a nivel de píxel.

| Nombre de los Factores | Factores y sus pesos | Residencial | Comercial | Industrial |
|--|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | K_R | K_R | K_R |
| 1. Uso del suelo (CLC1990) | F1 | 0,65 | 0,45 | 0,34 |
| 2. Lejanía a hidrografía | F2 | 0,95 | 0,90 | 0,88 |
| 3. Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos | F3 | 0,95 | 0,94 | 0,88 |
| 4. Lejanía a espacios naturales | F4 | 0,95 | 0,89 | 0,84 |
| 5. Protección de suelos de mayor productividad | F5 | 0,90 | 0,81 | 0,69 |
| 6. Pendiente | F6 | 0,95 | 0,89 | 0,92 |
| 7. Accesibilidad a carreteras | F7 | 0,70 | 0,35 | 0,56 |
| 8. Accesibilidad a zonas urbanas | F8 | 0,64 | 0,43 | 0,70 |
| 9. Accesibilidad a comercios | F9 | 0,78 | 0,48 | -- |
| 10. Accesibilidad a industrias | F10 | -- | -- | 0,80 |
| 11. Geotecnia | F11 | 0,88 | 0,77 | 0,85 |
| 12. Lejanía a instalaciones no deseables | F12 | 0,97 | 0,93 | 0,97 |
| 13. Accesibilidad a hospitales | F13 | 0,76 | 0,75 | 0,88 |
| 14. Distancia (ponderada) población | F14 | -- | 0,79 | 0,74 |
| 15. Cuencas Visuales | F15 | 0,97 | 0,94 | -- |
| 16. Orientación del terreno | F16 | 0,91 | 0,95 | -- |

Con el análisis anterior se determinaron los factores más influyentes en los resultados de la simulación del crecimiento urbano, así como la robustez del modelo. Adicionalmente, el resultado de la cartografía de píxeles más veces seleccionados nos corroborará la estabilidad del modelo y proporcionará una información complementaria sobre su robustez a nivel cartográfico.

De este modo, en la tabla 7 se recogen los porcentajes de coincidencia entre el modelo original y los 16 modelos ejecutados. Así, se puede observar que el modelo residencial coincide en un 38,4%, el modelo comercial en un 11,7% y el modelo industrial en un 47,1% con los 16 modelos ejecutados. Ahora bien, se puede decir que estos valores son relativamente bajos, especialmente en el caso del modelo comercial. No obstante, si se consideran las coincidencias del modelo original en más de 9 ocasiones (más de la mitad de veces posibles) estos porcentajes aumentan significativamente (94,6% para el modelo residencial, 75,4% para el modelo comercial y 94,9% para el modelo industrial).

Tabla 7. Porcentaje de coincidencias entre el modelo original y los 16 modelos ejecutados con los factores y pesos modificados.

| No. de veces Seleccionado | % Residencial | % Comercial | % Industrial |
|------------------------------|------------------|----------------|-----------------|
| 0 | 0,03 | 0,11 | 0,01 |
| 1 | 0,04 | 0,60 | 0,05 |
| 2 | 0,07 | 1,02 | 0,14 |
| 3 | 0,08 | 1,81 | 0,20 |
| 4 | 0,17 | 2,63 | 0,27 |
| 5 | 0,31 | 4,30 | 0,49 |
| 6 | 0,61 | 3,86 | 1,15 |
| 7 | 1,11 | 5,37 | 1,30 |
| 8 | 1,93 | 4,91 | 1,52 |
| 9 | 3,71 | 5,70 | 2,58 |
| 10 | 6,26 | 6,49 | 5,24 |
| 11 | 6,23 | 7,98 | 4,88 |
| 12 | 7,53 | 10,57 | 4,56 |
| 13 | 8,49 | 10,65 | 4,29 |
| 14 | 9,70 | 11,91 | 5,01 |
| 15 | 15,34 | 10,40 | 21,21 |
| 16 | 38,39 | 11,68 | 47,10 |
| $\Sigma = \text{Total}$ | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| $\Sigma \text{ de } 9 - 16$ | 94,6 | 75,4 | 94,9 |

Asimismo, en las figuras 5, 6 y 7 se puede apreciar espacialmente las coincidencias entre el modelo original y los 16 modelos ejecutados con variaciones en los factores y pesos para los usos residenciales, comerciales e industriales, respectivamente. Como se observó en el caso del modelo para zonas residenciales e industriales, las parcelas obtenidas en el modelo original coinciden prácticamente en un 100% en más de 9 ocasiones con los modelos ejecutados. No obstante, en el modelo para zonas comerciales, a ese mismo nivel sólo coinciden un 75% de las parcelas originales. Así, se puede apreciar de forma cartográfica (Figura 6, ventana 1) que hay un porcentaje considerable (~19%) de parcelas del modelo original que solo coinciden entre 5 y 8 veces con los modelos ejecutados, mientras que a ese mismo nivel los porcentajes para el modelo de zonas residenciales e industriales es menor al 5%. Esto puede deberse a que en el modelo para zonas comerciales los factores influyen individualmente de forma más significativa que en los otros dos modelos (Tabla 6).

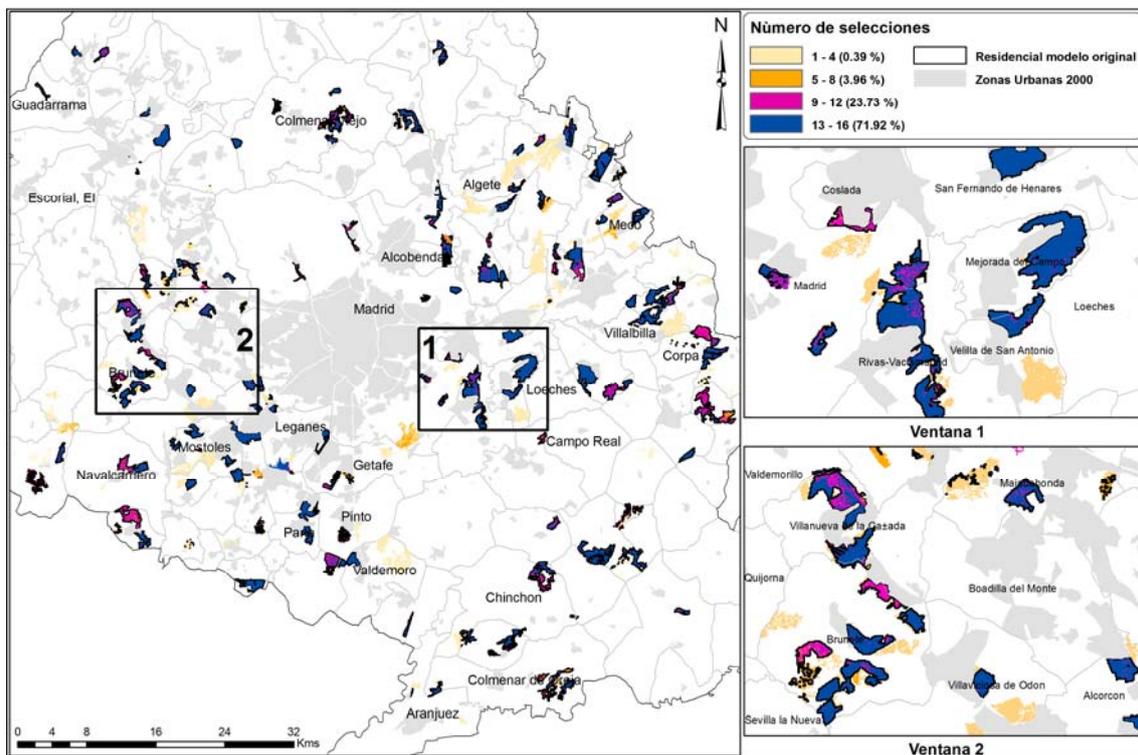


Figura 5. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los 16 modelos para el uso residencial con variación en los factores y pesos

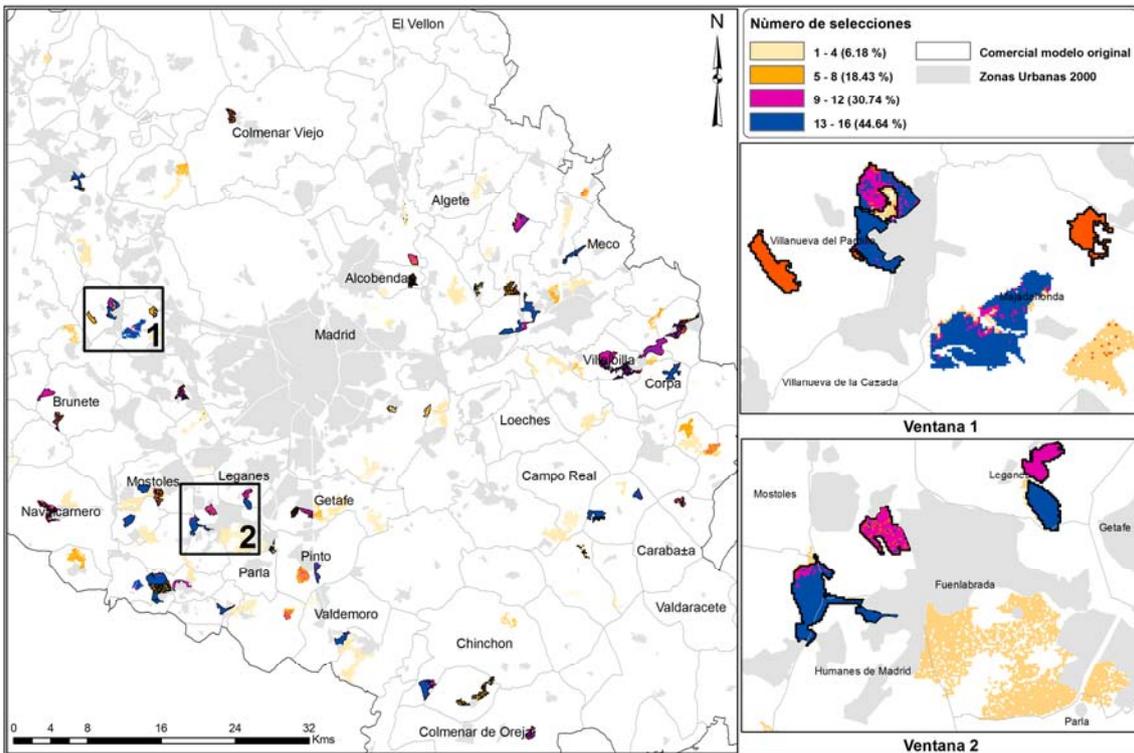


Figura 6. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los 16 modelos para el uso comercial con variación en los factores y pesos

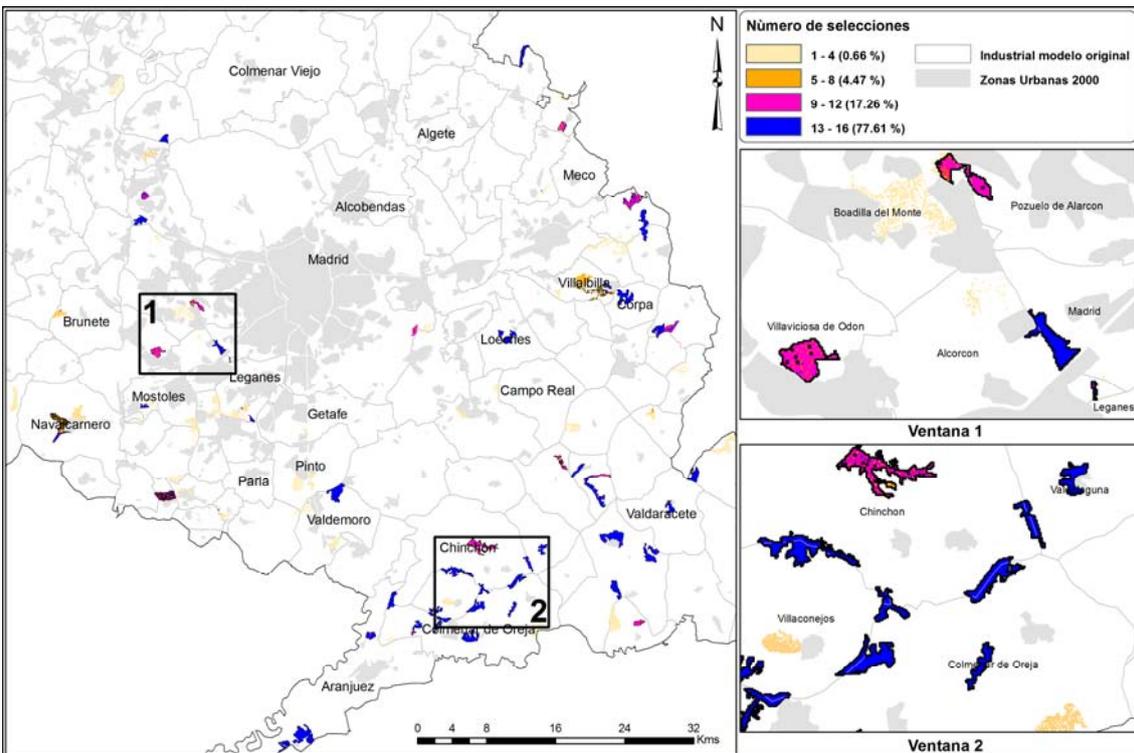


Figura 7. Cartografía de píxeles más veces seleccionados en la ejecución de los 16 modelos para el uso industrial con variación en los factores y pesos.

Por otro lado, si consideramos como indicador de robustez del modelo la diferencia media cuadrática, observamos que ésta no sobrepasa en ningún píxel las 10 unidades de

aptitud para los tres usos y que el valor medio de dicha diferencia no es mayor a 3,1 unidades (Tabla 8). Asimismo, se observó que los mayores porcentajes de no coincidencia se encuentran en un intervalo igual a la media \pm una desviación estándar (Figura 8). De este modo, se pudo verificar que las variaciones en los factores y pesos no afectan significativamente los resultados de los mapas de aptitud.

Tabla 8. Estadísticos básicos extraídos de los mapas de la diferencia media cuadrática para cada uso.

| Parámetros | Residencial | Comercial | Industrial |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| Mínimo | 0,24 | 0,19 | 0,24 |
| Máximo | 8,44 | 8,32 | 9,40 |
| Total | 3.278.091 | 3.308.005 | 3.016.358 |
| Media | 3,05 | 3,08 | 2,81 |
| SD | 1,01 | 1,09 | 1,20 |
| Rango | 8,21 | 8,13 | 9,16 |

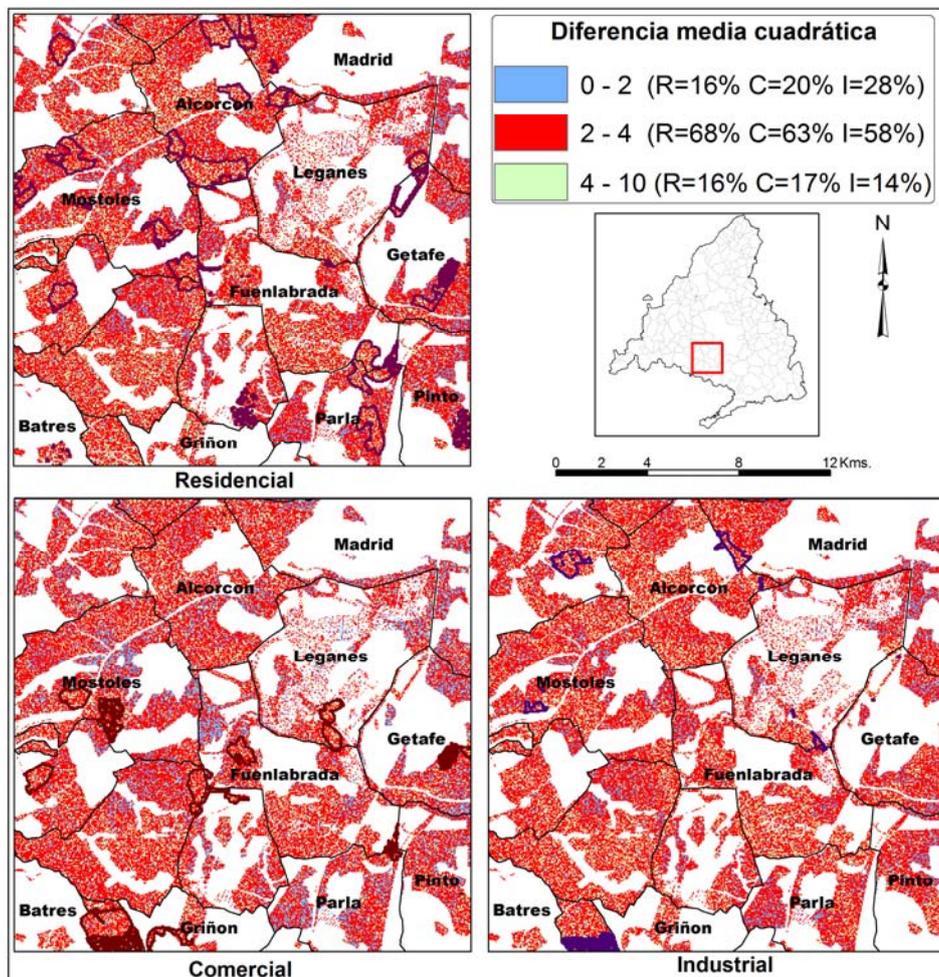


Figura 8. Diferencia media cuadrática a nivel de píxel.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la actualidad existe una cantidad considerable de técnicas numéricas para llevar a cabo AS en diferentes tipos de modelos, normalmente no espaciales. Dichas técnicas permiten detectar los factores que pueden estar influyendo en la estabilidad de los resultados del modelo, ejecutándolo una cantidad significativa de veces a partir de un análisis de Monte Carlo (Saltelli *et al.*, 2000). No obstante, cuando los factores de entrada son espaciales y/o temporales, estas técnicas son computacionalmente más complejas e incluso en ocasiones inabordables. Lo anterior hace que el AS sea a menudo ignorado o su aplicación muy limitada cuando se trabaja con modelos espaciales (Gómez Delgado y Bosque Sendra, 2004a; Lilburne y Tarantola, 2009). Aun así, dichas técnicas han sido aplicadas en algunos modelos espaciales, siendo las basadas en el análisis de la varianza las más utilizadas (*FAST*, *E-FAST*, *Sobol*, etc.). Sin embargo, dichos estudios se han limitado en introducir pequeñas variaciones a las distribuciones de frecuencia de los parámetros de los modelos PDF (aunque en el AS en modelos de EMC solamente se introducen pequeñas variaciones en los pesos dentro de un rango de una distribución uniforme, y la distribución de los factores propiamente dichos se deja fija). Es aquí es donde radica una de las grandes limitaciones de dichos AS, y, por lo tanto, donde impera la necesidad de implementar metodologías de AS explícitamente espaciales.

Al respecto, se observó que los resultados del AS utilizando las PDF de los parámetros y donde sólo se introduce variación a la distribución de los pesos sólo permitió detectar como máximo 5 factores significativos (Tabla 4). Mientras que la aplicación del AS considerando las PDF de los factores con variaciones a nivel de píxel, ha permitido detectar otros factores que influyen en los resultados de los modelos (Tabla 5). Así, podemos considerar que con la implementación de este tipo de AS se atenúan, en cierta medida, las deficiencias presentadas por estos métodos cuando se aplican a modelos espaciales, aunque, no hay que olvidar que éstas siguen sin contemplar la referencia geoespacial, por ejemplo, en el caso de modelo de uso del suelo, dichos AS no consideran la localización espacial de la demanda de suelo requerida en la simulación, y menos aún, la representación de forma espacial o cartográfica de los resultados.

Aun así, la metodología complementaria desarrollada en este trabajo (obtener la PDF de los factores con variación a nivel de píxel) podría ser aplicada a modelos espaciales que

contengan una gran cantidad de factores y donde el costo computacional sea demasiado alto para implantar un AS directamente en un SIG. De hecho, puede utilizarse como un AS previo que ayude a reducir la dimensionalidad del modelo, es decir, detectar los factores más significativos y con ellos posteriormente aplicar un AS explícitamente espacial.

En este sentido, la metodología de AS explícitamente espacial desarrollada en este trabajo solventa algunas de las deficiencias presentadas en los AS aplicados a modelos espaciales. Dicha metodología, implementada con las herramientas disponibles en el SIG Idrisi Andes, permitió obtener los factores más influyentes en los resultados del modelo a nivel local, utilizando un AS del tipo OAT. Para ello, se utilizó el índice *Kappa*, el cual dio el grado de acuerdo/desacuerdo entre los mapas binarios del modelo original y los obtenidos introduciendo los factores y pesos con variaciones a nivel de píxel. Además, se obtuvo el impacto de dichos factores a nivel espacial, representado por medio de la cartografía de píxeles más veces seleccionados en las 16 ejecuciones de los modelos. Asimismo, se calculó la diferencia media cuadrática existente entre el modelo original y los 16 modelos ejecutados con los factores y pesos con variación espacial. Lo anterior permitió hacer un AS integral del modelo de crecimiento urbano, ya que, por un lado, se detectaron los factores más influyentes y, por otro, su incidencia a nivel espacial.

Otro aspecto que es importante matizar es el hecho de que en las metodologías aplicadas se detectan los factores más significativos y/o influyentes con estadísticos diferentes (en el E-Fast con los índices de sensibilidad S_i y S_{T_i} y en el AS espacial con el índice K_R). Por ello, es importante establecer la relación que pudieran tener ambos estadísticos para que su aplicación se estandarice en futuros estudios. Al respecto, en este trabajo en particular, pudimos observar que, en general, entre estos estadísticos existe una relación inversamente proporcional, es decir, cuando S_i es alto, K_R es bajo (Figura 9). De tal manera, se podría inferir que cuando un factor recoge una cantidad alta de variabilidad del modelo ($S_i \approx 1$), este mismo será sustancialmente influyente en el resultado del modelo de simulación espacial ($K_R \approx 0$). No obstante, se observó que las mayores similitudes entre estos estadísticos se da con aquellos factores poco influyentes o significativos en los modelos, es decir, factores con un valor de *Kappa* alto y un índice de sensibilidad S_i bajo.

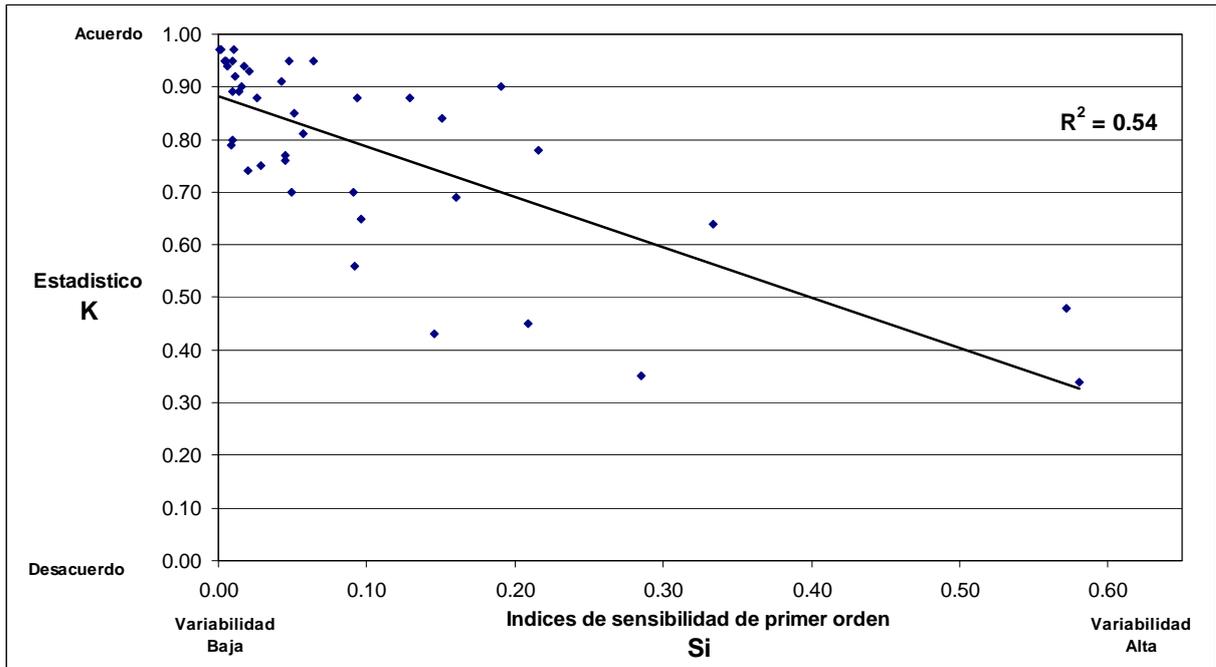


Figura 9. Relación entre los índices de sensibilidad de primer orden S_i y el estadístico K.

Finalmente, se pudo detectar a partir de las 3 metodologías aplicadas que los factores mas importantes, influyentes y/o significativos en los modelos son: el uso del suelo, la accesibilidad a: carreteras, zonas urbanas y comercios; la protección de suelos de mayor productividad, la accesibilidad a hospitales y la distancia ponderada por la población mas vulnerable y de mayor poder adquisitivo. Asimismo, se observó a partir de la cartografía de píxeles más veces seleccionados que el modelo de simulación del crecimiento urbano de futuro presenta un alto grado de robustez.

6. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se ha realizado dentro de las actividades del proyecto de investigación “SIMURBAN: Análisis y simulación prospectiva mediante Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) del crecimiento urbano actual. Evaluación de su sostenibilidad”, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC España) a través de la convocatoria 2006 de proyectos del Plan nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación 2004-2007, Programa nacional de Ciencias Sociales, Económicas y Jurídicas (referencia SEJ2007-66608-C04- 00/ GEOG).

7. REFERENCIAS

- Aguilera Benavente, F., Plata Rocha, W., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M. (2009). “Diseño y simulación de escenarios de demanda de suelo urbano en ámbitos metropolitanos”, *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 4, pp. 57-80.
- Aldana, A. T. (2005). “Cartografía de los cambios en las cubiertas artificiales de la Comunidad de Madrid-España”, *Revista forestal latinoamericana*, 35, pp. 59-86.
- Baja, S., Chapman, D. M., Dragovich, D. (2007). “Spatial based compromise programming for multiple criteria decision making in land use planning”, *Environmental Model & Assessment*, 12, pp. 171-184.
- Barredo Cano, J. I. y Gómez Delgado, M. (2008). “Towards a set of IPCC SRES urban land-use scenarios: modelling urban land-use in the Madrid region”, en: Paegelow, M. and Camacho Olmedo, M. T. (Ed.): *Modelling Environmental Dynamics, Advances in Geomatic Solutions*, Springer, pp. 363- 385.
- Brunsdon, C., Carver, S., Charlton, M., Openshaw, S. (1990). “A review of methods for handling error propagation in GIS”, *Proceedings of the European Conference on GIS*, pp. 106-116.
- Canters, F., Genst, W. De., Dufourmont, H. (2002). “Assessing effects of input uncertainty in structural landscape classification”, *International Journal of Geographical Information Science*, 16 (2), pp. 129-149.
- Chang, N. B., Parvathinathan, G., Breeden, J. B. (2008). “Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region”, *Journal of Environmental Management*, 87, pp. 139–153.
- Crosetto, M., Tarantola, S., Saltelli, A. (2000). “Sensitivity and uncertainty analysis in spatial modelling based on GIS”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81, pp. 71–79.
- Crosetto, M., Moreno Ruiz, J. A. Crippa, B. (2001). “Uncertainty propagation in models driven by remotely sensed data”, *Remote Sensing of Environment*, 76 (3), pp. 373-437.
- Crosetto, M. y Tarantola, S. (2001). “Uncertainty and sensitivity analysis: tools for GIS-based model implementation”, *International Journal of Geographical Information Science*, 15 (5), pp. 415-437.
- Crosetto, M., Crosetto, F. Tarantola, S. (2002). “Optimized resource allocation for GIS-based model implementation”, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68 (3), pp. 225-232.
- Cukier, R. I., Fortuin, C. M., Schuler, K. E., Petschek, A. G., Schaibly, J. H. (1973). “Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients”. Part I: Theory, *Journal of Chemical Physics*, 59 (8), pp. 3873-3878.

- EEA, European Environment Agency (2006). *Urban sprawl in Europe, the ignored challenge*. EEA Report 10.
- Franco Maass, S. y Bosque Sendra, J. (1997). “Procedimiento para la obtención de parcelas de adecuación en imágenes raster”, *I Reunión de usuarios Españoles de Idrisi*, Alcalá de Henares, España.
- Gago Garcia, C., Serrano Cambronero, M., Antón Burgos, F. J. (2004). “Repercusiones de las carreteras orbitales de la Comunidad de Madrid en los cambios de usos del suelo”, *Anales de Geografía*, 24, pp. 145-167.
- Geneletti, D. y van Duren, I. (2008). “Protected area zoning for conservation and use: A combination of spatial multicriteria and multiobjective evaluation”, *Landscape and Urban Planning*, 85, pp. 97-110.
- Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2005). *Sistemas de Información Geografía y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*, Madrid, Ed. Ra-Ma.
- Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2004a). “Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision-making: a review”, *Human and Ecological Risk Assessment*, 10, pp. 1173-1187.
- Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2004b). “Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones”, *Geofocus*, 4, pp. 179-208.
- Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2009). “Validation of GIS-Performed analysis”, en: Joshi, P. K., Pani, P., Mohapatra, S. N., Singh, T. P. (Ed.): *Geoinformatics for Natural Resource Management*, Nova Science Publishers, pp. 559-571.
- Gómez Delgado, M. y Tarantola, S. (2006). “Global sensitivity analysis, GIS and multicriteria evaluation for a sustainable planning of hazardous waste disposal site in Spain”, *International Journal of Geographical Information Science*, 20, pp. 449-466.
- Jankowski, P. (1995). “Integrating geographic information systems and multiple criteria decision making methods”, *International Journal of Geographical Information Systems*, 9, pp. 251–273.
- Lamelas Gracia, M. T. (2009). “Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial”, *Geofocus*, 9, pp. 28-66.
- Landis, J. R. y Koch, G. G. (1977). “The measurement of observer agreement for categorical data”, *Biometrics*, 33, pp. 159-174.
- Lilburne, L. y Tarantola, S. (2009). “Sensitivity analysis if spatial models”, *International Journal of Geographical Information Science*, 23 (2), pp. 151-168.

- Lodwick, W. (1989). "Developing confidence limits on errors of suitability analysis in GIS", en Goodchild, M.F. y Gopal, S. (Eds.): *The accuracy of spatial databases*. London, Taylor & Francis, pp. 69-78.
- López de Lucio, R. (2003). "Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid", *Urban*, 8, pp. 124-161.
- Lowry, J. H., Miller, H. J., Hepner, G. F. (1995). "A GIS-based sensitivity analysis of community vulnerability to hazardous contaminants on the Mexico/US border", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61 (11), pp. 1347-1359.
- OSE, Observatorio de la Sostenibilidad en España (2006). *Cambios de ocupación del suelo en España. Implicaciones para la sostenibilidad*. Alcalá de Henares, España, OSE.
- Pettit, C. J. (2002). *Land use planning scenarios for urban growth: a case study approach*, Phd Thesis. University of Queensland.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2009). "Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la comunidad de Madrid (1990-2000)". *Scripta-Nova*, volumen XIII, 293. Disponible en: <http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-293.htm>.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (En revision 1). "Spatial and statistical analysis of factors explaining urban growth in the Community of Madrid", *The annals of Regional Science*.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (2010). "Desarrollo de modelos de crecimiento urbano óptimo para la Comunidad de Madrid aplicando Métodos de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica"; *GeoFocus* (Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica), Vol. 10, pp. 103-134.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., Bosque Sendra, J. (En revision 2). "Simulating urban growth scenarios using GIS and Multicriteria Evaluation techniques. Case study: Madrid Region, Spain", *Environment and Planning B*.
- Qureshi, M. E., Harrison, S. R., Wegener, M. K. (1999). "Validation of multicriteria analysis models", *Agricultural Systems*, 62, pp. 105-116.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Chan, K. (1999a). "A quantitative model independent method for global sensitivity analysis of model output", *Technometrics*, 41, pp. 39-56.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Chan, K. (1999b). "A role for Sensitivity Analysis in presenting the results from MCDA studies to Decision Makers", *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, 8 (3), pp. 139-145.
- Saltelli, A., Chan, K. y Scott, E. M. (2000). *Sensitivity Analysis*, Chichester, UK: Wiley, LTD.

- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*, UK: Wiley, LTD.
- Santiago Rodríguez, E. de (2007). “Madrid, ciudad única. Pautas y lógicas espaciales recientes en la región madrileña”, *Urban*, 12, pp. 8-33.
- Serrano Cambronero, M., Gago García, C., Antón Burgos, F. J. (2002). *Impacto territorial de las carreteras orbitales de la Comunidad de Madrid*. Dirección General de Investigación, Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid, España.
- Tang, Y., Reed, P., Wagener, T., van Werkhoven, K. (2007). “Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation”, *Hydrology and Earth system Sciences*, 11, pp. 793-817.
- Varella, H., Guèrif, M., y Buis, S. (2010). “Global sensitivity analysis measures the quality of parameter estimation: The case of soil parameters and a crop model”, *Environmental Modelling & Software*, 25, pp. 310-319.
- Wagener, T. y Kollat, J. (2007). “Numerical and visual evaluation of hydrological and environmental models using the Monte Carlo analysis toolbox”, *Environmental Modelling & Software*, 22, pp. 1021-1033.

Capítulo 7

CONCLUSIONES GENERALES

7. CONCLUSIONES GENERALES

7.1. Conclusiones

Aunque en cada capítulo se incluyen las conclusiones correspondientes a cada artículo, creemos importante reflexionar de manera integral sobre las principales aportaciones y/o conclusiones que se han obtenido tras la finalización del trabajo de investigación realizado en esta tesis doctoral.

Siguiendo los objetivos que nos hemos planteado en la introducción, puntualizaremos las ideas más relevantes, que a la vez contrastan la hipótesis de partida.

Primero, y en cuanto a la **descripción de los cambios de uso del suelo** registrados en la región madrileña, podemos señalar que la metodología empleada en dicho análisis ha permitido detectar los cambios reales (ganancias, pérdidas, intercambios, etc.) en diferentes niveles de detalle según la cartografía del *Corine Land Cover*. Esto refrenda el valor y la utilidad de este enfoque para el estudio de la dinámica de la ocupación del suelo. Con ella se pudo determinar aspectos relevantes y significativos en la dinámica territorial de la Comunidad de Madrid entre los años 1990 y 2000, tales como:

- Un incremento muy importante de la superficie de las zonas urbanas existentes en 1990, cifras de las más elevadas en España en ese período.
- Dicho crecimiento urbano se ha realizado en gran medida a costa de antiguas zonas agrícolas.
- En concreto, han sido especialmente afectadas las zonas de cultivos que en 1990 se encontraban cerca de áreas urbanas. Por otra parte, la disminución de las zonas agrícolas también se ha producido al pasar algunas de ellas a ser ocupadas por usos forestales (arbolado o vegetación arbustiva).
- Otra característica significativa de la dinámica de la ocupación del suelo en Madrid ha sido el mantenimiento en extensión de superficie de las zonas forestales existentes en 1990, si bien no ha disminuido su presencia en la región, ha cambiado su ubicación geográfica en el territorio madrileño.

Con este análisis se pudo contrastar que el uso de información oficial y homogénea, hasta cierto punto, y el uso de una metodología adecuada permite conocer a fondo las dinámicas ocurridas en los usos y coberturas del suelo.

En segundo lugar, podemos confirmar que el objetivo perseguido con el **análisis de los factores relacionados con el crecimiento del suelo urbano** registrado en la Comunidad de Madrid se ha alcanzado satisfactoriamente. En dicho análisis se logró integrar un conjunto considerable de variables de tipo socioeconómico, biofísico, de accesibilidad, y otros. Resaltar el hecho que los modelos fueron ejecutados considerando subcategorías de suelo urbano, es decir, la estructura urbana laxa, urbanizaciones exentas y ajardinadas, las zonas comerciales e industriales y las zonas en construcción, a diferencia de otros trabajos en los que solo se analiza la categoría urbano en general. Además, las variables integradas en este análisis fueron utilizadas en dos unidades de observación espacial. Por un lado, las variables socioeconómicas están capturadas a nivel municipal, y las variables de proximidad y biofísicas están referidas a un nivel de más detalle en el territorio, el píxel. Lo anterior indujo la aplicación de diferentes técnicas de regresión (RLM, PLS, RLE, MLA) con la finalidad de darle un tratamiento adecuado a dicha información. Esto permitió lograr un mejor entendimiento sobre los factores conductores del crecimiento urbano en la región de Madrid, así como validar o corroborar los resultados obtenidos, y salvar algunos de los problemas que presentaban algunos métodos, como por ejemplo la correlación que presentaban algunas variables explicativas, las inferencias hechas con variables agregadas, la poca cantidad de observaciones a nivel municipal, entre otros.

En cuanto a la determinación de las fuerzas conductoras de las dinámicas urbanas podemos mencionar como las más significativas la accesibilidad a las zonas urbanas, carreteras y el CBD, la altitud y pendiente del terreno, la superficie propuesta para urbanización en la legalidad vigente, la densidad de población y el incremento de la renta, entre otras.

Con estos datos podemos decir que la exploración de una cantidad de variables y la determinación de cuáles fueron las más significativas en el crecimiento de suelo urbano, al menos estadísticamente, puede ser de gran utilidad para aquellos que deseen realizar modelos de simulación del crecimiento urbano, ya que con éstas se estará en condiciones de plantear diferentes alternativas de crecimiento urbano futuro.

En lo referente a la **elaboración de modelos normativos y a la simulación de escenarios futuros** se pudieron realizar algunos ensayos sobre la asignación óptima de nuevas zonas urbanas, así como de diferentes alternativas futuras, de los cuales se pudieron extraer algunas consideraciones de interés.

Primero, en la asignación óptima de nuevas zonas residenciales, comerciales e industriales en la Comunidad de Madrid entre 1990 y 2000 se aplicaron algunos aspectos metodológicos novedosos en este campo, principalmente, en la modelización de los factores, como es el caso del factor uso del suelo, accesibilidad a zonas urbanas y la distancia ponderada a la población. Con la modelación de dichos factores fue posible incluir algunas cuestiones básicas sobre la sostenibilidad de los modelos territoriales, tal es el caso, de asignar las nuevas zonas urbanas entorno a las ciudades medias e intermedias, proteger las zonas de mayor productividad y valor ambiental, así como acercar las nuevas zonas comerciales a los núcleos urbanos donde se ubica la población con mayor poder adquisitivo y bajo una distribución que maximiza la captación de usuarios potenciales, y alejar a la población mas vulnerable de las nuevas zonas industriales.

Asimismo, dicho modelo se implementó contando con una cantidad considerable de factores (obtenidos de una recopilación de variables espaciales tratadas en un SIG), que nos han permitido incluir ciertos criterios de sostenibilidad. También, es de considerar el hecho de que se incluyera en el análisis un mapa de restricción, obtenido a partir de las zonas no urbanizables de protección, el cual quizá no garantice que los nuevos usos se asignen en los sitios de mayor adecuación, pero si da un sustento realista y objetivo a la simulación de los modelos de crecimiento urbano deseables.

También se puede asegurar que el modelo normativo deseable obtenido entre 1990 y 2000 garantiza un modelo de ocupación del territorio con un mayor grado de sostenibilidad que el crecimiento real ocurrido en el mismo periodo. Destacar que no es común que las técnicas de Evaluación Multicriterio sean utilizadas para modelar usos del suelo entre dos fechas pasadas. Sin embargo, su implementación permitió realizar un análisis entre el crecimiento urbano ocurrido y lo que hubiese sido deseable entre dichas fechas. Del mismo modo dio las pautas para generar dos escenarios de futuro, un escenario deseable partiendo de los datos reales del año 2000 y otro partiendo del modelo de crecimiento urbano óptimo obtenido al mismo año.

Al respecto, se puede concluir que los dos escenarios planteados a partir del año 2000 al 2020 presentan cierta compacidad en la distribución de los nuevos usos del suelo, lo cual da un carácter sostenible al territorio madrileño en el futuro. Pero además, se está garantizando que estos usos se asignen, según los factores planteados, en las mejores condiciones ambientales, económicas y sociales y en un marco legal establecido por los entes planificadores del territorio.

Otro aspecto relevante fue el uso de modelos normativos para implementar diferentes escenarios de futuro (tendencia, crisis y de innovación y sostenibilidad). Dichos escenarios proporcionan información importante sobre los potenciales impactos ambientales, territoriales, económicos y sociales que podrían ocasionar la continuación de las actuales políticas de planificación y el crecimiento económico basado en la especulación inmobiliaria (escenario de tendencia), una situación de recesión económica como la vivida en la actualidad (escenario de crisis) y/o alternativas de desarrollo más sostenibles (escenario de innovación y sostenibilidad). En este sentido, podemos decir que la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio para la simulación de modelos de crecimiento urbano de futuro se presentan como una alternativa más en la ciencia de la geosimulación.

No hay que olvidar también que dichas simulaciones se hacen a futuro, partiendo de la ocupación del suelo del año 2000 y con un horizonte al 2020, y utilizando variables espaciales ponderadas según el nivel de importancia que tengan en el planteamiento conceptual de cada escenario, por lo cual, los resultados obtenidos deben ser tratados con cautela, ya que no es posible realizar una comparación real con datos futuros.

Una alternativa que se utiliza en este trabajo para estimar la confiabilidad de los resultados de dichas simulaciones de futuro es el **Análisis de Sensibilidad (AS)**. Con dicho análisis se pudo determinar las variables más importantes en la simulación del escenario de sostenibilidad, así como su robustez. Al respecto, se pudo detectar a partir de 3 metodologías de AS aplicadas, que los factores más importantes, influyentes y/o significativos en los modelos son: el uso del suelo, la accesibilidad a: carreteras, zonas urbanas y comercios; la protección de suelos de mayor productividad, la accesibilidad a hospitales y la distancia ponderada por la población más vulnerable y con poder adquisitivo. Del mismo modo, se obtuvo que los modelos obtenidos para las zonas residenciales, comerciales e industriales presenta un grado de robustez o confiabilidad

satisfactorio considerando para ello la cartografía de píxeles mas veces seleccionados (94,6%, 75,4% y 94,9%, respectivamente para usos de suelo simulados y considerando que los modelos coinciden en mas de 9 ocasiones).

Por otro lado, el cálculo de la demanda de suelo urbano futuro para los escenarios aplicando un modelo de dinámica de sistemas hace que los escenarios sean más realistas, ya que ésta se obtiene en función de la manipulación de algunas variables sociodemográficas. Asimismo, reconocer que el uso del módulo *BuildScenary* fue de gran utilidad en la asignación/simulación de usos de suelo en los diferentes escenarios.

Finalmente, decir que dichos modelos y escenarios de futuro podrían servir para discutir exhaustivamente sobre las disparidades, desequilibrios o beneficios que pueden ocasionar al territorio madrileño si se sigue una línea evolutiva u otra de las presentadas en los escenarios. Asimismo, el planteamiento metodológico seguido para la implementación de los escenarios es factible de ser utilizado para generar otras líneas evolutivas que podrían ser propuestas por los entes involucrados en la planificación del territorio.

En resume, consideramos que la investigación presentada posee un carácter integral sobre la simulación del crecimiento urbano de la Comunidad de Madrid. De este modo, se siguió una secuencia lógica, fácil de ser extrapolable a otras áreas de estudio, iniciando con la descripción del cambio de usos de suelo y, concretamente, del crecimiento urbano, seguido de la exploración de las posibles causas que ocasionaron dichos cambios y, por último, con la simulación de diferentes alternativas de crecimiento urbano futuro. Señalar que el uso de las Tecnologías de la Información Geográfica fueron de gran utilidad e incluso sin éstas difícilmente se podría hacer este tipo de análisis de manera eficiente en cuanto a la optimización de tiempo y recursos.

7.2. Futuras líneas de investigación

Llegados a este punto de la investigación se plantearan algunas de las líneas posibles a investigar en un futuro próximo.

Un aspecto estudiado en este trabajo fue el análisis del crecimiento urbano aplicando diferentes técnicas estadísticas y utilizando dos unidades de observación diferentes. Al respecto, creemos importante seguir estudiando este tema pero aplicando otras técnicas

de regresión que tengan en cuenta la posición geográfica del objeto de estudio, tal es el caso de la regresión geográficamente ponderada.

Por otro lado, hemos venido mencionado que las técnicas de EMC no han sido ampliamente utilizadas en la simulación de escenarios. Si bien en este trabajo se aplicaron algunas técnicas compensatorias y no compensatorias, creemos importante profundizar más en la aplicación de otras técnicas, tales como: el análisis del punto ideal, la sumatoria lineal ponderada borrosa, entre otras. Así como la modelación de usos del suelo aplicando técnicas de simulación que están siendo aplicadas en los últimos años, tal es el caso de los Modelos Basados en Agentes.

En lo que respecta a la evaluación de la confiabilidad de los resultados de los modelos podemos decir que es un campo donde todavía hay mucho por hacer. Ante esto, se profundizará más en la generación de propuestas para realizar análisis de sensibilidad de modelos espaciales. Asimismo, y como interés personal, en un futuro próximo nos introduciremos en otras técnicas que permiten también valorar los resultados de los modelos, como son el análisis de incertidumbre basado en los errores de los datos de entrada de los modelos.

Por ultimo, se tiene gran interés por extrapolar este tipo de estudios a otras áreas de estudio con diferentes características a las estudiadas en esta investigación.

