

Simulación de un escenario tendencial de ocupación y usos del suelo en la Comunidad de Madrid, España

M. Gallardo¹, J. Martínez-Vega²

¹ Departamento de Geografía, Universidad de Concepción. C. Víctor Lamas 1290, Casilla 160-C, Concepción, Biobío, Chile.

² Instituto de Economía, Geografía y Demografía (CSIC). C. Albasanz 26-28, 28037 Madrid.

mgallardob@udec.cl, javier.martinez@cchs.csic.es

RESUMEN: En este trabajo se elabora una simulación de ocupación y usos del suelo de la región de Madrid en 2025, bajo un escenario tendencial, utilizando el software libre CLUE. Utiliza como fuente los mapas de usos del suelo de CORINE Land Cover de 1990, 2000 y 2006, reclasificados en 7 categorías. Se utilizan algunas variables explicativas, restricciones e incentivos locacionales con el objetivo de diseñar mapas de probabilidad de localización. Los diferentes usos del suelo se relacionan con las variables explicativas utilizando un método de regresión logística. El mapa de 2025 muestra la extensión y distribución geográfica de cada uno de los usos del suelo. El uso industrial y comercial es el que más crecerá (+36%) junto al urbano (+33%). Las tierras de labor experimentarán grandes pérdidas (-12%). Las zonas de agricultura heterogénea y las forestales apenas registrarán cambios. Se pretende que el modelo final sea útil para la toma de decisiones de los gestores del territorio y facilite una planificación preventiva del territorio.

Palabras-clave: ocupación y usos del suelo, simulación, CLUE, Comunidad de Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

Existe un interés creciente en conocer los cambios de usos del suelo que se han producido en un territorio, así como las causas que los han propiciado y las consecuencias que han generado, pues dichos cambios tienen implicaciones tanto ambientales como sociales y económicas. Hoy en día el interés de los estudios de cambios de usos del suelo va más allá de la recopilación de datos y la representación en forma de mapas, se centra en una modelización más dinámica que permita comprender el pasado, monitorear la situación actual y predecir trayectorias futuras (Gallardo y Martínez-Vega, 2012).

Los modelos de cambios de usos son una herramienta de aprendizaje para desentrañar los factores explicativos y las dinámicas del sistema y sirven también para explorar la sensibilidad de los patrones de usos a cambios definidos por determinadas variables biofísicas, socio-económicas y espaciales. Juegan, además, un importante papel en explorar posibles desarrollos futuros (Veldkamp y Lambin, 2001; Verburg et al. 2006). La elaboración de escenarios futuros permite descubrir el efecto que puede provocar, en los usos del suelo, perpetuar la evolución que se ha mantenido durante los años pasados y prever las consecuencias si dichas pautas son modificadas. Así, los escenarios de usos del suelo pueden ser tomados como una potente herramienta o un instrumento en el que apoyarse para diseñar futuras ordenaciones del territorio. Por ello, existe una necesidad de desarrollar escenarios y evaluaciones a escala regional o local para identificar los patrones de usos del suelo con características óptimas que satisfagan simultáneamente objetivos económicos, sociales y medioambientales (Parker et al., 2002).

Los modelos de cambios de usos del suelo y de simulaciones llevados a cabo hasta ahora son muy numerosos, abarcando temas de deforestación en relación con la expansión de la agricultura o de los pastizales (Kok et al., 2001; Sangermano et al., 2012), el abandono de las tierras agrícolas (Rounsevell et al., 2003) así como el crecimiento y la dispersión urbana (Conway, 2009; Plata Rocha et al., 2010; Jokar et al., 2013), entre otros.

El objetivo de este trabajo es elaborar un mapa de usos del suelo en la Comunidad de Madrid con un horizonte temporal fijado en 2025. Se utilizará el modelador CLUE. Las tendencias recientes de cambios de usos del suelo, observadas a partir de la serie CORINE-Land Cover (CLC), serán la fuente de información

principal.

El área de estudio es la Comunidad de Madrid. Tiene una superficie reducida de 8.021 km². Incluye la ciudad de Madrid junto a su gran área metropolitana. Posee una población de 6.454.440 hab y registra una densidad de población de 805 hab/km², la más alta de España (INE, 2015). La región tiene un rico patrimonio natural y cultural amenazado por la implementación de un modelo de desarrollo que consume muchos recursos (Naredo y Frías, 2005; Mata et al., 2009) provocando un aumento en los niveles económicos y el desarrollo de grandes zonas industriales, zonas residenciales e infraestructuras en toda la región desde la década de 1950 (Chicharro, 1976; Díaz-Muñoz, 1984; Gutiérrez, 1998; Naredo, 2008; Naredo y García-Zaldívar, 2008) y, sobre todo, en los últimos 20 años (Gago et al, 2004; Delgado, 2008; Fernández-Muñoz, 2008; Gallardo y Martínez-Vega, 2010, 2012). Presiones similares sufren otras regiones con características semejantes en Europa (Jongman, 2002) y en otros continentes (Radeloff et al., 2010).

2. METODOLOGÍA

2.1. Material

La información de partida con la que se contó son los mapas de usos del suelo CLC de 1990, 2000 y 2006. Se trabajó con una clasificación de usos del suelo que comprende 7 categorías diferentes (urbano, industrial y comercial, tierras de labor, agricultura heterogénea, bosque, matorral y pastizal, y otros). Se reclasificaron a partir del CLC nivel 3. La categoría “Otros” engloba usos del suelo que se consideran estables en el periodo analizado (roquedos, cursos y láminas de agua). Las redes de transporte, terrenos asociados y aeropuertos se han considerado dentro de dicha categoría por su dificultad a la hora de simular dichos crecimientos, ya que responden a políticas gubernamentales.

Además, se hizo uso de otra información cartográfica: mapas litológicos, de altitud, pendientes distancias a determinadas entidades y accesibilidad. Como se verá posteriormente, se realizaron mapas de probabilidad de localización de usos del suelo.

2.2. Elaboración del escenario futuro

El modelador de cambios de usos del suelo CLUE (Conversion of Land Use and its Effects modelling framework) fue desarrollado para simular cambios de usos del suelo mediante relaciones empíricamente cuantificadas entre los usos del suelo y sus factores explicativos, en combinación con un modelo dinámico de competición entre los diferentes usos del suelo con los que se trabaja. Es un modelo dinámico, espacialmente explícito y multi-escalar. Se trata, además, de un software libre (Veldkamp y Fresco, 1996; Verburg et al, 1999).

El modelo está dividido en dos módulos diferentes: un módulo de demandas no espaciales y un módulo de procedimientos de asignación espacialmente explícito. El primero calcula la superficie de cambio de cada uno de los usos del suelo que se desean modelar; se pueden especificar aquí diferentes tipos de modelos, desde simples extrapolaciones de tendencias hasta modelos más complejos. El módulo de asignación está basado en una combinación de análisis empíricos y espaciales y modelados dinámicos; está dividido en diferentes sub-módulos (políticas espaciales y restricciones; lugares de preferencia específica; elasticidades de conversión; factores explicativos). Conjuntamente crean una serie de condiciones y posibilidades para las cuales el modelo calcula la mejor solución mediante un procedimiento iterativo.

La preferencia de una localización está estimada mediante una serie de factores explicativos que determinan los cambios de usos del suelo. Para conocer su influencia en cada uno de los usos del suelo pueden utilizarse diferentes técnicas estadísticas.

Las seis categorías de usos del suelo dinámicas (urbano, industrial y comercial, tierras de labor, agricultura heterogénea, bosque, matorral y pastizal) fueron relacionadas como una variable binaria de presencia y ausencia con factores explicativos utilizando el método de regresión logística (Tabla 1).

La accesibilidad se consideró como coste por desplazamiento. Para ello, se diferenciaron tres tipos de redes de transporte: autopistas/autovías, carreteras nacionales y carreteras secundarias; los núcleos de población se consideraron puntuales, sin superficie. Con la velocidad máxima específica de cada tramo se determinó la impedancia de la red, en segundos/metros, constituyendo así una superficie de fricción. La distancia fue calculada mediante la distancia en línea recta a los diferentes elementos, y el coste de desplazamiento fue calculado mediante el algoritmo *Cost weighted distance*, dependiendo de la velocidad a la que se puede circular por las diferentes vías (Tabla 2).

Tabla 1. Variables explicativas utilizadas en la modelización del escenario a futuro.

Nombre de la variable	Descripción	Tipo
<u>Socio-económicas o de distancia</u>		
Distancia a la ciudad	Distancia a la ciudad de Madrid	Continua
Distancia a otras ciudades y al aeropuerto	Distancia a otras ciudades y al aeropuerto de Barajas	
Distancia a carreteras	Distancia a carreteras	
Distancia a vías férreas	Distancia a la red de ferrocarril	
Accesibilidad a la ciudad	Tiempo de acceso a la ciudad de Madrid	
Accesibilidad a otras ciudades y al aeropuerto	Tiempo de acceso a otras ciudades y al aeropuerto de Barajas	
Accesibilidad a carreteras	Tiempo de acceso a las carreteras.	
<u>Biofísicas</u>		
Altitud	Altitud	Continua
Pendiente	Pendiente en %	
Distancia a ríos	Distancia a los principales ríos	
Distancia a embalses	Distancia a los embalses	
Litología	Litología	Binaria

Tabla 2. Velocidades asignadas e impedancia para cada tipología de red viaria.

Tipo de vía	Velocidad asignada (Km/h)	Impedancia (s/m)
Autopista/Autovía	120	0,030
Carretera Nacional	100	0,036
Carretera Secundaria	80	0,045

Las variables mencionadas en la tabla 1 fueron relacionadas con cada uno de los usos del suelo utilizando el método de regresión logística *forward stepwise regression*. Se consideraron valores de probabilidad de 0,01 para entrar en el modelo y 0,02 para eliminar la variable. Se seleccionó una muestra del 10%, a partir de un conjunto de datos de 3.211.166 celdas, con el objetivo de reducir la autocorrelación espacial y que ésta no afectase a los resultados (Overmars et al., 2003; McDonald y Urban, 2006). Asimismo, se llevó a cabo un análisis de correlación de Pearson y las variables que se mostraban correlacionadas fueron eliminadas del modelo, por no proporcionar una contribución significativa (Gallardo, 2014). Se optó por seleccionar únicamente una de ellas. La bondad de ajuste del modelo de regresión logística se midió mediante el estadístico ROC (*Relative Operating Characteristic*). Los valores que pueden obtenerse de este estadístico oscilan entre 0 y 1, considerándose un valor por debajo de 0,5 como una nula influencia de las variables explicativas (Pontius y Schneider, 2001). Los valores obtenidos de estos análisis fueron utilizados para representar mapas de probabilidad de localización para cada uno de los usos del suelo. Se tuvo en cuenta una matriz de cambio para definir qué transiciones son posibles y dónde pueden localizarse.

Para la definición de las demandas en el escenario tendencial, se llevó a cabo una extrapolación de tendencias de cambios de usos del suelo entre 1990 y 2006, observando los valores de crecimiento o decrecimiento de cada uso del suelo acontecido en este periodo. Las hectáreas asignadas para el año 2025 con respecto a lo que ocupaba cada uso del suelo en el año 2006 se muestran en la tabla 3. La categoría “otros”, al considerarse como estable, se mantiene con la misma extensión.

Otro elemento que posee CLUE son las elasticidades de conversión. Están relacionadas con la reversibilidad del cambio del uso del suelo. Existen usos del suelo que son fácilmente convertibles, por ejemplo las tierras agrícolas frecuentemente se convierten en urbanas debido al propio desarrollo urbano; por el contrario, es muy difícil que los usos urbanos cambien a otro tipo de uso del suelo.

Se consultó la legislación sobre espacios naturales protegidos, planes de ordenación de masas de agua, limitaciones de cambios de usos del suelo en los márgenes de ríos, carreteras y ferrocarriles, la ley de aguas y la ley de suelo de la Comunidad de Madrid para localizar zonas donde los cambios de usos del suelo están

restringidos o prohibidos. Además, se utilizó la información sobre áreas quemadas detalladas en el nivel 3 de CLC2006. Al estar bajo una legislación que prohíbe el cambio de uso del suelo en 30 años, estas áreas se consideraron estables. Tan sólo se prevén cambios a matorral o a bosque una vez transcurridos 10 años, según sea su uso del suelo inicial.

Tabla 3. Superficie en hectáreas que ocupan los diferentes usos el suelo en 2006 y proyección al año 2025.

<i>Uso del suelo</i>	2006	2025
Urbano	84.793	112.969
Industrial y comercial	15.762	21.473
Tierras de labor	245.331	216.463
Agricultura heterogénea	52.146	52.153
Bosque	78.525	77.883
Matorral y pastizal	307.147	302.765
Otros	19.087	19.087

En cuanto a las áreas de preferencia o de incentivos, se incluyeron como localización preferencial de usos urbanos e industriales y comerciales, las zonas que, en el planeamiento, aparecen como urbanizables y las áreas que especifica el mapa de Áreas potenciales de Desarrollo de la región metropolitana de Madrid, en el que se detallan áreas que pueden ser convertidas a usos urbanos, industriales o terciarios.

También se aplicaron factores de vecindad a los usos del suelo urbano e industrial y comercial con una configuración de 5x5 y al uso bosque con una vecindad de 2x2.

La calibración y la validación del modelo (Pontius et al., 2004) se han realizado comparando el mapa simulado de 2006 con el mapa de referencia del mismo año. Aunque se sugiere la utilización de datos diferentes para la estimación de ambos, solo se cuenta con tres datos temporales, por lo que sería necesario un cuarto dato temporal para validar el modelo de manera independiente. La calibración se realizó ajustando los valores de la demanda, los factores de vecindad y las elasticidades de conversión.

En la validación se utilizó el estadístico Kappa que indica el acuerdo observado entre dos conjuntos de datos respecto al acuerdo esperado al azar. Los valores de este coeficiente comprenden desde 1 (perfecto ajuste) a -1 (no hay ningún ajuste); el valor 0 representa un ajuste igual al que se obtendría por azar. Los desajustes pueden ser causados por dos tipos de disimilitud: 1) disimilitud causada por la cantidad de cambio de las clases de usos del suelo (*K Histogram*); y 2) disimilitud causada por la localización de los usos del suelo en un mapa (*K Location*) (Pontius, 2000). En este caso de estudio, el desajuste está asociado únicamente a la localización espacial, ya que la cantidad simulada en 2006 está determinada por la cantidad real que existía ese año, es decir, no se está prediciendo.

Asimismo, se analizaron cada uno de los usos del suelo por separado, observando el porcentaje y la localización de las áreas en las que hubo cambio y se predijo adecuadamente (*hits*), donde hubo cambio pero no se consiguió predecirlo (*misses* u errores de omisión) y donde no hubo cambio y, sin embargo, se predijo (*false alarms* o errores de comisión).

3. RESULTADOS

3.1. Trayectoria pasada

Es de esperar que lo sucedido en el pasado tenga relación con lo que puede ocurrir en el futuro. Por ello, se realizó un análisis de lo ocurrido entre 1990 y 2006. A lo largo de este periodo, los usos urbano e industrial y comercial crecieron continuamente (desde 49.269 y 7.791 ha. en 1990, respectivamente, hasta 84.793 y 15.762 ha. en el año 2006). Las tierras de labor experimentaron un decrecimiento continuo (desde 281.936 ha. en 1990 hasta 245.331 ha. en 2006). La agricultura heterogénea y los bosques se mantuvieron más o menos estables, experimentando altibajos en estos años (en torno a 52.000 ha. y 80.000 ha., respectivamente).

Estos resultados observados se utilizaron para determinar las demandas futuras de cada uso del suelo en 2025, mediante extrapolación.

3.2. Variables explicativas

La relación de los usos del suelo con las variables explicativas mediante regresión logística determina la probabilidad de localización de los primeros.

Se observó que la localización del uso urbano está relacionada con pendientes bajas, cercanía a otras ciudades y al aeropuerto de Barajas y un tiempo de viaje menor a la propia ciudad de Madrid. El uso industrial y comercial está relacionado también con pendientes escasas, mayor accesibilidad a las carreteras y a otras ciudades y al aeropuerto y menor distancia a las vías férreas. Las tierras de labor se relacionan con zonas de poca pendiente y cercanas a cursos fluviales, sobre suelos de limos y con materiales de fondo de valle, evitando los suelos conformados por rocas plutónicas y metamórficas. Por otra parte, la agricultura heterogénea se localiza sobre limos y arenas y en áreas con menor pendiente y altitud. El bosque y el matorral y pastizal, sin embargo, tienen más probabilidad de localizarse en zonas con mayor pendiente. El bosque se relaciona también con menor accesibilidad a las carreteras. El matorral y pastizal se asientan sobre suelos conformados por rocas plutónicas y metamórficas.

En cuanto a la bondad de ajuste de los modelos de regresión logística, el *Area Under the Curve* (AUC) estaba comprendida entre 0,763, correspondiente a la agricultura heterogénea, y 0,852, correspondiente al uso urbano.

3.3. Escenario tendencial en 2025.

Se observa un crecimiento de los usos urbano, industrial y comercial, con respecto a 2006, de 33,23% y 36,23%, respectivamente. También se percibe un decrecimiento de las tierras de labor de -11,77% y de -1,43% para el matorral y pastizal. La agricultura heterogénea y el bosque, se mantienen prácticamente estables, con valores de 0,01% y de 0,82%, respectivamente.

La figura 1 muestra la evolución que ha seguido la comunidad de Madrid desde 1990 (a), 2000 (b) y 2006 (c) hasta el escenario de trayectoria lineal de 2025 (d).

La figura 2 muestra los cambios de usos del suelo que se registrarán entre 2006 y 2025, en caso de que se hiciese realidad un escenario tendencial. Los usos del suelo han sido resumidos con la idea de mostrar los cuatro cambios de usos principales.

Se puede observar la gran artificialización que experimentará la región en el caso de continuar con la trayectoria registrada en los años pasados, debido a un amplio crecimiento de los usos urbano, industrial y comercial. El uso urbano se extenderá, de forma compacta, en los alrededores de la metrópoli, especialmente hacia el sur y sureste, siguiendo las principales vías de transporte. Asimismo, registrará un crecimiento de tipo disperso en las zonas de la Sierra, en torno a Torrelodones y Collado Villalba. Ejemplos de localidades que experimentarán una gran expansión son Tres Cantos, Valdemoro, Villanueva de la Cañada o Aranjuez.

El uso industrial y comercial se extenderá hacia el sur y sureste de la metrópoli y en torno a la autopista A-2. Ambas categorías ganarán terreno a costa de las tierras de labor, que perderán superficie también debido a su conversión en matorral y pastizal, especialmente en la zona suroccidental de la región.

Los bosques conseguirán permanecer prácticamente estables

En cuanto a la validación del escenario, se registró un valor Kappa de 0.868. Se obtuvieron valores *K Location* de 0.869 y *K Histogram* de 0.998.

En la tabla 4 se muestra la proporción de aciertos y errores de cada uso del suelo comparando el mapa real y simulado de 2006.

Es conveniente que los *misses* y *false alarms* tengan valores similares. Una predicción alta de *false alarms* pero baja en *misses* puede provocar, ficticiamente, valores más altos en *hits*, ya que, si se predice más cambio del que se ha experimentado en la realidad, hay mayor probabilidad de acertar. Los *hits* mostrados son altos porque el análisis tiene en cuenta la persistencia. Los usos bosque, matorral y pastizal son los que alcanzan el porcentaje de acierto más alto. La peor predicción es la referida al uso industrial y comercial.

4. CONCLUSIÓN

La creación de escenarios futuros no está exenta de dificultades. Los usos del suelo operan en sistemas complejos, sobre sistemas sociales y ecológicos interrelacionados. Además, las interrelaciones espaciales entre variables cambian con la escala.

A pesar de estas dificultades, la realización de escenarios futuros de usos del suelo sigue siendo de gran interés para la gestión territorial. Los resultados obtenidos demuestran el incremento de los usos

artificiales a costa de los espacios agrícolas y forestales. Si este escenario se hiciese realidad las consecuencias ambientales y territoriales serían preocupantes. Algunas de ellas serán: el aumento de las interfaces agrícola-forestal, pasto-forestal y urbano-forestal, principales causas de ignición, por lo que se prevé un incremento en el riesgo de incendio forestal y en la vulnerabilidad socioeconómica de los espacios afectados por las áreas quemadas, el incremento de las amenazas sobre los espacios naturales protegidos y los hábitats de importancia comunitaria, cambios en los patrones del paisaje regional, aumento de la fragmentación de hábitats naturales y pérdida de conectividad que dificultará el movimiento de especies terrestres, cambios en los servicios ambientales, etc.

Por todo ello, los resultados de esta investigación tienen utilidad social y una vertiente aplicada. Interesan a los gestores regionales, responsables de los servicios de prevención y lucha contra incendios forestales, áreas protegidas y planificación territorial.

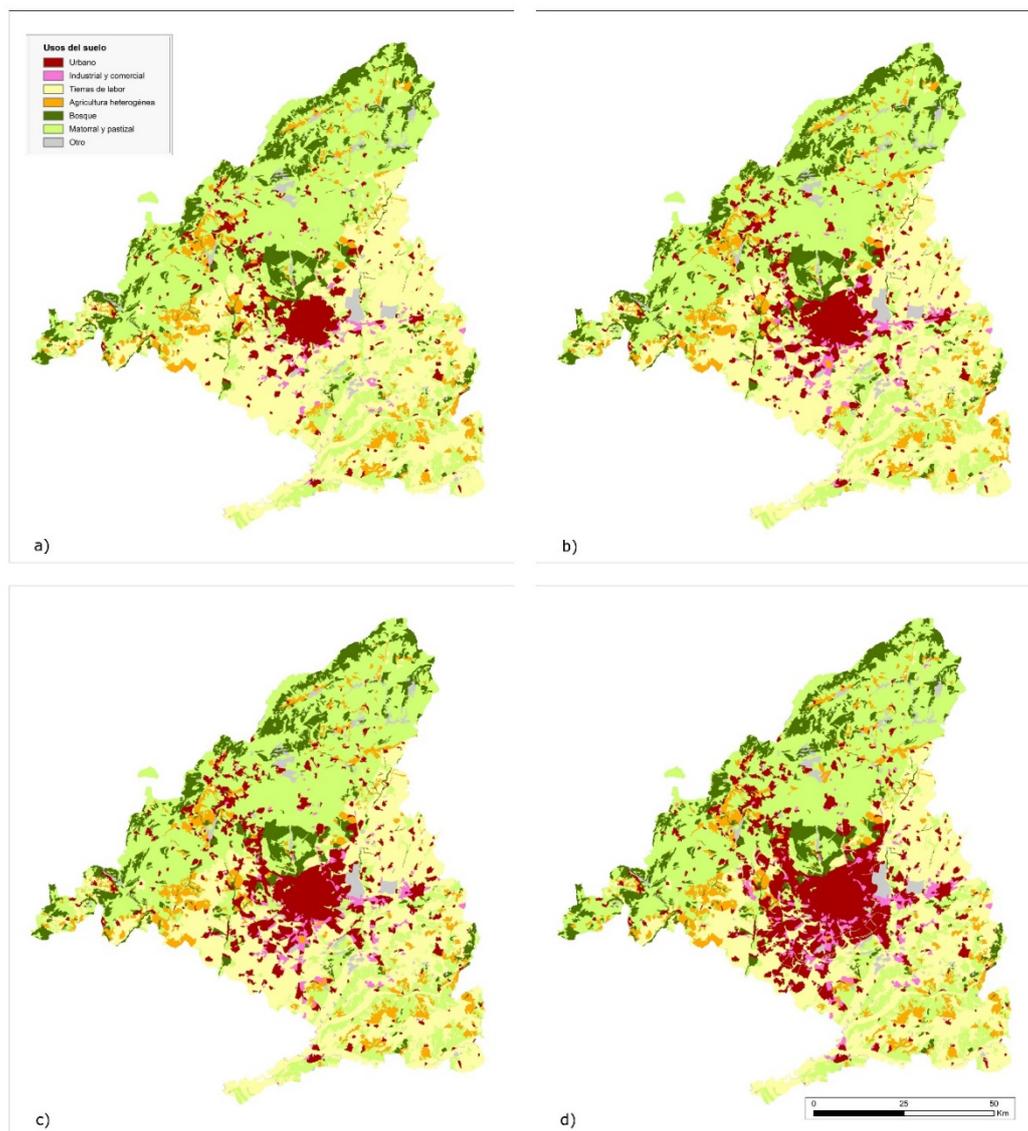


Figura 1. Evolución de los usos del suelo en la Comunidad de Madrid, en los años 1990 (a), 2000 (b), 2006 (c) y 2025 (d). Este último modelo se ha elaborado considerando un escenario tendencial. La leyenda es común para los cuatro mapas.

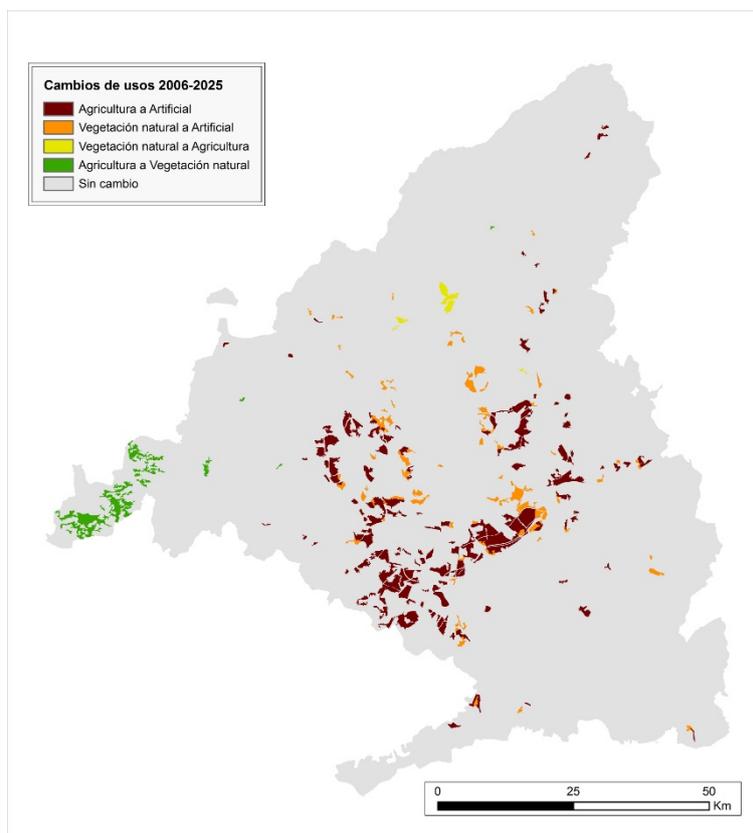


Figura 2. Resumen de los cambios de usos del suelo que se producirán en la Comunidad de Madrid bajo un escenario tendencial, entre los años 2006 y 2025.

Tabla 4. Hits, misses y false alarms de cada uso del suelo. Los datos se expresan en porcentaje.

<i>Usos del suelo</i>	<i>Hits</i>	<i>Misses</i>	<i>False Alarms</i>
Urbano	60,33	19,77	19,90
Industrial y comercial	34,77	32,47	32,76
Tierras de labor	83,09	8,37	8,54
Agricultura heterogénea	83,74	8,65	7,62
Bosque	89,34	5,11	5,56
Matorral y pastizal	89,02	5,56	5,42

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de M. Gallardo, mediante una beca Jae-Predoc del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Agradecemos a P.H. Verburg, de la Vrije University, Amsterdam, por su enseñanza y apoyo en el manejo del software CLUE.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Chicharro, E. (1976): “Application of Landsat-2 data to land use mapping in Central Spain”. En Nuñez R. (ed.) Thematic Mapping, Land Use, Geological Structure and Water Resources in Central Spain. Madrid, NASA project 28760, 216–219.
- Conway, T.M. (2009): “The impact of class resolution in land use change models”. Computers, Environment and Urban Systems, 33, 269-277.
- Delgado, C. (2008): “Urbanización sin fronteras. El acoso urbanístico a los espacios naturales protegidos”. Boletín de la AGE, 47, 271–310.

- Díaz-Muñoz, M.A. (1984): “Criterios para el análisis de la evolución de usos del suelo en zona de montaña: aplicación a un sector de Somosierra”. *Anales de Geografía*, 4, 131–147.
- Fernández-Muñoz, S. (2008): “Participación pública, gobierno del territorio y paisaje en la Comunidad de Madrid”. *Boletín de la AGE*, 46, 97–119.
- Gago, C., Serrano, M., Antón, F.J. (2004): “Repercusiones de las carreteras orbitales de la Comunidad de Madrid en los cambios de usos del suelo”. *Anales de Geografía*, 24, 145–167.
- Gallardo, M., Martínez-Vega, J. (2010): “Detecting land use change in Madrid, Spain, using Corine Land Cover maps”. En VV.AA. (eds.) Ester Boserup Conference. A centenal tribute. Long-term trajectories in population, gender relations, land use and the environment. Vienna, Alpen Adria Universitaet.
- Gallardo, M., Martínez-Vega, J. (2012): “Cambios de usos del suelo en la Comunidad de Madrid: analizando el pasado y simulando el futuro”. En Martínez-Vega, J., Martín Isabel P. (eds) XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Tecnologías de la información geográfica en el contexto de Cambio Global. Madrid. 305-314.
- Gallardo, M. (2014): Cambios de usos del suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid. Análisis de tres décadas de transformación territorial y proyección futura. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. <http://eprints.ucm.es/25253/>
- Gutiérrez, A. (1998): Cambios de usos del suelo y modelos de organización espacial de un paisaje de montaña mediterránea. El valle del Lozoya (Sistema Central de Madrid). Madrid, Universidad Autónoma de Madrid.
- INE (2015): Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del Padrón municipal a 1 de enero, <http://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2853>, consultado el 25 de mayo de 2015.
- Jokar Arsanjani, J., Helbich, M., Kainz, W., Darvishi Bolorani, A. (2013): “Integration of logistic regression, Markov chain and cellular automata models to simulate urban expansion”. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 265-275.
- Jongman, R.H.G. (2002): “Homogeneisation and fragmentation of the European landscape: ecological consequences and solutions”. *Landscape and Urban Planning*, 58, 211–221.
- Kok, K., Farrow, A., Veldkamp, A., Verburg, P.H. (2001): “A method and application of multi-scale validation in spatial land use models”. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 223-238.
- McDonald, R.I., Urban, D.L. (2006): “Spatially varying rules of landscape change: lessons from a case study”. *Landscape and Urban Planning*, 74, 7-20.
- Mata, R., Galiana, L., Allende, F., Fernández, S., Lacasta, P., López, N., Molina, P., Sanz, C., (2009): “Evaluación del paisaje de la Comunidad de Madrid: de la protección a la gestión territorial”. *Urban*, 14, 34–57.
- Naredo, J.M. (2008): “Cambios y tendencias de la ocupación del suelo en la Comunidad de Madrid (1956–1986–2005)”. En VVAA (eds) *La evolución de los usos del suelo en Madrid*. Madrid, Consejería de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente.
- Naredo, J.M., Frías, F. (2005): “Desarrollo: la síntesis del «desarrollo sostenible» con especial referencia a la Comunidad de Madrid”. En Sánchez-Herrera, F. (Ed.) *Cuartas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Paular*. Conservación y desarrollo socioeconómico en Espacios Naturales Protegidos. Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Comunidad de Madrid.
- Naredo, J.M., García-Zaldívar, R. (2008): Estudio sobre la ocupación del suelo por usos urbano-industriales, aplicado a la Comunidad de Madrid. Madrid, UPM-Ministerio de Medio Ambiente.
- Overmars, K.P., de Koning, G.H.J., Veldkamp, A. (2003): “Spatial autocorrelation in multi-scale land use models”. *Ecological Modelling*, 164, 257-270.
- Parker, D.C., Berger, T., Manson, S.M. (2002): “Agent-based models of Land-use and Land-cover change”. En: *LULC Report Series No.6*. LUC International Project Office, Louvain-la-Nueve. 124 pp.
- 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, 103-134.

- Pontius Jr, R.G. (2000): "Quantification error versus location error in comparison of categorical maps". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 1011-1016.
- Pontius Jr, R.G., Schneider, L.C. (2001): "Land-cover change model validation by a ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA". *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 239-248.
- Pontius Jr, R.G., Huffaker, D., Denman, K. (2004): "Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models". *Ecological Modelling*, 179, 445-461.
- Radeloff, V.C., Stewart, S.I., Hawbaker, T.J., Gimmi, U., Pidgeon, A.M., Flather, C.H., Hammer, R.B., Helmers, D.P. (2010): "Housing growth in and near United States protected areas limits their conservation value". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 940-945.
- Rounsevell, M.D.A., Annetts, J.E., Audsley, E., Mayr, T., Reginster, I. (2003): "Modelling the spatial distribution of agricultural land use at the regional scale". *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 95, 465-479.
- Sangermano, F., Toledano, J., Eastman, J.R. (2012): "Land cover change in the Bolivian Amazon and its implications for REDD+ and endemic biodiversity". *Landscape Ecology*, 27, 871-584.
- Veldkamp, A., Fresco, L.O. (1996): "CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects". *Ecological Modelling*, 85, 253-270.
- Veldkamp, A., Lambin, E.F. (2001): "Predicting land-use change". *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85, 1-6.
- Verburg, P.H., de Koning, G.H.J., Kok, K., Veldkamp, A., Bouma, J. (1999): "A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use". *Ecological Modelling*, 116, 45-61.
- Verburg, P.H., Kok, K., Pontius Jr, R.G., Veldkamp, A. (2006): "Modeling land-use and land-cover change" En Lambin, E.F., Geist, H.J. (eds) *Land-use and land-cover change. Local processes and Global Impacts*. Springer, Berlin. 117-135.