

CADENAS DE MARKOV, EVALUACIÓN MULTICRITERIO Y EVALUACIÓN MULTI OBJETIVO PARA LA MODELIZACIÓN PROSPECTIVA DEL PAISAJE

MARTIN PAEGELOW

Laboratorio GEODE. Universidad de Toulouse Le Mirail
5, Allées Antonio Machado. 31058 Toulouse (Francia)

paegelow@univ-tlse2.fr

MARÍA TERESA CAMACHO OLMEDO

Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Granada
C/ Rector López Argüeta s/n. 18071 Granada

camacho@ugr.es

JOSÉ MENOR TORIBIO

Dpto. de Territorio y Patrimonio Histórico. Universidad de Jaén
Campus Las Lagunillas. 23071 Jaén

jmenor@ujaen.es

RESUMEN

Los Sistemas de Información Geográfica incluyen entre sus funciones de análisis aquellas destinadas a la modelización espacio-temporal. En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de un método prospectivo, que combina el análisis de una serie cronológica de usos del suelo (cadenas de Markov) con la puesta en relación de estos usos y un conjunto de variables explicativas (evaluación multicriterio), para, por último, asignar a cada píxel una categoría de ocupación del suelo (evaluación multiobjetivo) en la fecha proyectada, proceso complementado con un algoritmo de automatismo celular que mide la contigüidad local. La modelización prospectiva de dos áreas de estudio comparables, aunque con dinámicas paisajísticas específicas, permite evaluar la metodología y precisar sus aportaciones y sus límites.

Palabras clave: Modelización espacio-temporal, sistemas de información geográfica, dinámica del paisaje, usos del suelo.

ABSTRACT

Geographic Information Systems includes among the variety of analytical functions those intended to spatial-temporal modelling and decision support. This paper focus on GIS methods and

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157

results about prospective land cover modelling applied to two mountain basins in Eastern Pyrenees (France) and Sierra Nevada (Spain). The methodological approach combines a Markovian chain analysis, based on a chronological set of land use maps, related to a knowledge database about land cover dynamics in time and space and criteria which are considered responsible for the observed changes (multi-criteria evaluation). Finally each pixel is assigned to a predicted land cover by multi-objective evaluation, an assessment completed by a cellular automata to take into account spatial contiguity. The prospective modelling of two comparable test areas, in spite of specific landscape dynamics, allows to test the methodology and to specify contributions and limits.

Keywords: Spatial-temporal modelling, geographic information systems, landscape dynamics, land use.

1. Introducción

El valle de los Garrotxes, en los Pirineos Orientales franceses, y la comarca de la Alta Alpujarra, en la vertiente sur de Sierra Nevada, como otras áreas montañosas mediterráneas, se ven afectados por una profunda reestructuración de índole económica, social y paisajística. Con el fin de reconstruir esta evolución y precisar las tendencias de cambio o de estabilidad paisajística, se ha venido desarrollando en el marco de un proyecto de investigación¹ un estudio paralelo de la ocupación del suelo en ambos espacios montañosos, como componente que mejor recoge el uso y las actividades de las sociedades en el espacio. La elaboración de una base de datos de la cartografía evolutiva de los usos del suelo y vegetación en la segunda mitad del siglo XX, en concreto de cuatro fechas o cortes (1962, 1980, 1989 y 2000 en los Garrotxes, y 1957, 1974, 1987 y 2001 en el caso de la Alta Alpujarra), y su posterior análisis y tratamiento mediante las funciones propias de un Sistema de Información Geográfica, facilitan una serie de documentos cartográficos que ilustran los procesos de transformación del paisaje del área de estudio. Tras el análisis pormenorizado de la dinámica de los usos del suelo, la base de datos espacial se ha completado con una serie de variables descriptivas y supuestamente explicativas de dicha evolución.

A partir de este punto, el objetivo del proyecto es la aproximación a una modelización paisajística de tipo retrospectivo (para trazar la historia de los paisajes) y prospectivo (como ayuda a la toma de decisiones). En otras palabras, se persigue obtener una cartografía anterior y posterior a la serie cronológica de la segunda mitad del siglo XX, a partir de la información almacenada en la base de datos, ya sea la referida a la ocupación del suelo como al resto de las variables de índole natural o humana que pueden influir en su dinámica.

Para ello se han puesto en marcha de manera simultánea tres tipos de métodos que nos permitirán comparar sus resultados y precisar sus aportaciones y sus límites: el método estadístico de los datos funcionales, los algoritmos de redes neuronales y el método basado fundamentalmente en las cadenas de Markov.

1. El método estadístico basado en datos funcionales o modelo paramétrico de tipo logístico (Cardot, 1999) consiste en una modelización que utiliza las funciones polinomiales, considerando no solamente la ocupación del suelo sino también las variables ambientales supuestamente explicativas. La función integra, en consecuencia, la mayor parte de las capas de información de la base de datos espacial. Este método, ante la excesiva distancia temporal de la serie cartográfica, construye indicadores intermedios que tienen en cuenta a la vez las variables y el efecto espacio-temporal. Los cálculos permiten obtener, como resultado, una serie de mapas de carácter prospectivo o retrospectivo. Una vez realizados los primeros ensayos sobre un pequeño sector de los Garrotxes, se intenta aplicar actualmente el método al conjunto de las áreas de estudio para confirmar su validez.

2. Los algoritmos de redes neuronales con múltiples capas se han convertido en métodos que, en determinadas ocasiones, aventajan a las funciones estadísticas clásicas, con la posibilidad además de proponer soluciones no lineales (Bishop, 1994). El objetivo, en este caso, es el de proponer una red de neuronas y estudiar las propiedades en un marco lo más amplio posible, puesto que se trata de datos espacio-temporales a los que hay que añadir variables explicativas suplementarias. Por ello, la utilización de este método resulta adecuada, ya que tiene en cuenta el carácter correlacionado de las variables, tanto de naturaleza cronológica como espacial. Hasta el momento, los primeros ensayos han ofrecido un resultado de 26% de superficie mal estimada en los Garrotxes, y se trabaja en la mejora de la red para disminuir el reparto aleatorio de algunas categorías de usos del suelo.

3. Por último, el método basado en las cadenas de Markov, la evaluación multicriterio (EMC) y la evaluación multiobjetivo (EMO), se apoya en la constatación de diferencias significativas de comportamiento espacio-temporal en relación con una repartición teórica supuesta (espacio homogéneo e isótropo), analizando de hecho el impacto de la "rugosidad" geográfica. Esta rugosidad depende de un conjunto de variables conocidas, disponibles y cartografiadas a una escala compatible con la serie cronológica de los mapas de usos del suelo.

En las páginas siguientes se muestran, en concreto, los primeros resultados de la aplicación de este último método. Para ello se han utilizado las funciones de análisis espacio-temporal que ofrece un Sistema de Información Geográfica en formato ráster (SIG Idrisi 32 Release 2) en un ensayo de modelización prospectiva de las áreas de estudio. Se ha buscado la proyección de la situación probable en los años 2000 (Garrotxes) y 2001 (Alta Alpjarra) para compararla con la cartografía real de los usos del suelo en las mismas fechas y poder evaluar con mayor precisión la metodología empleada.

2. Método de modelización prospectiva utilizando cadenas de Markov, EMC y EMO

En los últimos años, los SIG comerciales han ido incorporando como funciones de análisis aquéllas destinadas a la modelización. Es el caso de la función CA_MARKOV, que ha sido incluida en la última versión del SIG IDRISI como módulo experimental, enriqueciendo el bloque dedicado al análisis de series temporales. Esta función permite integrar la modelización temporal (basándose en una serie cronológica de usos del suelo) y la lógica basada en la evaluación multicriterio y

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44.
ISSN: 1578-5157

multiobjetivo (mediante la puesta en relación de las categorías de usos del suelo y un conjunto de variables de diversa naturaleza que pueden explicar o describir su dinámica), es decir, complementa el análisis multitemporal con el análisis multivariable para obtener una modelización más ajustada a la dinámica real de los paisajes. Además de ello, un algoritmo de automatismo celular mide la contigüidad local e incrementa la probabilidad de pertenecer a una categoría por vecindad.

La obtención de la cartografía prospectiva de las áreas de estudio es posible tras la aplicación de los siguientes módulos de análisis:

- Cadenas de Markov y proyección estocástica
- Evaluación multicriterio (EMC)
- Evaluación multiobjetivo (EMO) y cadenas de Markov acopladas a un algoritmo de automatismo celular

2.1. Cadenas de Markov y proyección estocástica

El módulo de las cadenas de Markov (MARKOV) simula la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados precedentes. Esto significa que la modelización no tiene en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema, que, en nuestro caso, corresponde a la evolución de los usos del suelo.

Se trata de un procedimiento discreto en un tiempo discreto, en donde el valor en el tiempo t_1 depende de los valores en los tiempos t_0 y t_1 (cadena markoviana de segundo orden). El algoritmo compara dos mapas de ocupación del suelo que se suceden cronológicamente, y estima y configura una matriz de probabilidad de transición. La predicción se materializa en una serie de mapas de ocupación del suelo (uno para cada categoría) para un tiempo futuro, en donde el nivel digital de cada píxel expresa la probabilidad de pertenecer a la categoría analizada.

La aplicación de este módulo a las series cronológicas de las áreas de estudio ha ofrecido como resultados, por lo tanto, una matriz de probabilidades de transición entre todas las categorías de ocupación del suelo ([tabla 1](#) y [tabla 2](#)), una matriz de áreas de transición donde se indica el número de píxeles que pueden sufrir una transformación (documento necesario para la aplicación de la función CA_MARKOV), y, por último, una serie de mapas de probabilidad condicional (0-1) para cada una de las categorías en el tiempo t_1 , como proyección desde t_0 . Para ello se considera el número de unidades temporales (años en nuestro caso, que definen el número de iteraciones) transcurridos entre t_1 y t_0 , y entre esta última fecha y la que se pretende modelizar (t_1), asumiendo una evolución lineal. En el caso de los Garrotxes se ha proyectado la situación del año 2000 a partir de las fechas de 1980 y 1989, mientras que en la Alpujarra Alta se parte de las fechas de 1957 y 1987 para modelizar la cartografía de 2001.

A este respecto hay que indicar que una de las limitaciones del algoritmo de las cadenas de Markov es la necesidad de contar con las mismas categorías en todas las fechas de la serie temporal, de tal forma que la desaparición o nueva aparición de alguna de ellas impide aplicar el método. Es

el caso de la categoría "Mosaico de cultivos abandonados/ no abandonados", cartografiada en la Alta Alpujarra en 1987 y en 2001, pero inexistente en la cartografía de 1974, lo que ha obligado a la elección de la fecha de 1957 en su lugar. A pesar de que, teóricamente, un número mayor o menor de unidades temporales transcurridas no impiden el cálculo, sí es cierto que una serie temporal irregular puede ocultar dinámicas acaecidas que son fundamentales para la extrapolación futura. Además, esta limitación implica que la proyección sólo es posible si no existen nuevos usos del suelo o bien si no desaparecen algunos de ellos, lo que constituye una exigencia incompatible con la propia dinámica espacio-temporal de los paisajes.

Una vez obtenidos los mapas de probabilidad para cada categoría, se ha aplicado el módulo de proyección estocástica (ST_CHOICE), que evalúa para cada píxel la probabilidad de pertenecer a una u otra categoría y configura un mapa único que soluciona las incompatibilidades entre ellas (evaluación multiobjetivo), como se muestra en el mapa de proyección estocástica de 2000 de los Garrotxes ([figura 1](#)), y en el de 2001 de la Alta Alpujarra ([figura 2](#)).

Este algoritmo se basa en la probabilidad de que la aptitud hacia una categoría de ocupación del suelo supere una repartición aleatoria (siendo ésta diferente en cada iteración), atribuyéndole finalmente a cada píxel una de las categorías consideradas según la aptitud más adecuada. Por ello, los mapas de proyección estocástica sólo pueden considerarse un resultado intermedio que arbitra las probabilidades markovianas de transición entre categorías de ocupación del suelo a través del tiempo según criterios estrictamente probabilísticos. Además, el proceso de asignación no tiene en cuenta los criterios topológicos o de proximidad, por lo que, en consecuencia, la representación cartográfica simula el efecto "picado de viruelas", a pesar de que las grandes tendencias de la dinámica son visibles. Estas limitaciones, entre otras, exigen la aplicación de otros módulos que permitan la integración del factor de vecindad y, sobre todo, la inclusión de las variables explicativas de la dinámica paisajística.

2.2. Evaluación multicriterio (EMC)

Las variables físicas y humanas que configuran la base de datos han sido elegidas por ser explicativas o descriptivas de la dinámica del paisaje y de los usos del suelo en las áreas de estudio (Camacho, 2000) ([tabla 3](#)), siendo cartografiadas a una escala compatible con la resolución de la serie cronológica. La evaluación multicriterio (EMC) permite integrar esas variables, ya sean determinantes o bien factores de aptitud, las pondera y compensa, y, finalmente, tras la sumatoria lineal, ofrece como resultado una serie de mapas que expresan la capacidad de acogida del territorio para cada categoría de usos del suelo. Para la aplicación de este módulo se ha tomado como referencia la distribución de los usos del suelo en las fechas previas a la proyección (1987 en la Alta Alpujarra y 1989 en los Garrotxes), aunque, puntualmente, ha sido considerada la serie cronológica para calcular la probabilidad de cambio de cada categoría.

Con el objetivo de facilitar la elección de las variables más significativas para cada categoría de usos del suelo, se ha procedido en primer lugar a la obtención y análisis de las cifras absolutas y relativas procedentes de la superposición de cada variable y del mapa de usos del suelo,

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157

y de los resultados de un índice de asociación o correlación (Cramer’s V) entre ellas. De esta manera se han precisado las *restricciones* y los *factores*:

1. Las *restricciones* corresponden a mapas binarios (0/1) o booleanos, en donde las zonas excluidas del análisis o máscaras gráficas (valor 0) pueden corresponder al fondo no útil de la imagen, a categorías de usos del suelo incompatibles con la analizada, o bien a las clases o intervalos de aquellas variables significativas donde se ha comprobado la ausencia justificada de dicha categoría. Por ello, algunas de las restricciones son comunes a diversas categorías, mientras que otras son específicas del uso analizado.

2. Los *factores* son mapas cuyos niveles digitales se distribuyen en una escala standard, desde 0 (nada apto) a 255 (muy apto), indicando la menor o mayor aptitud del píxel para que se localice el uso analizado. Para la configuración de dichos mapas, y en función de la naturaleza cualitativa o cuantitativa de cada variable y de su grado de asociación con el mapa de usos del suelo, se ha optado por diversos métodos:

- Standarización de las variables cuantitativas cuya gradación ascendente o descendente se adecue a la aptitud para la localización del uso del suelo analizado.
- Ponderación de las clases o intervalos de las variables cuantitativas o cualitativas en función de la ocupación del uso del suelo analizado.
 - Ponderación según el porcentaje real
 - Ponderación según el porcentaje real y su desajuste (sobreestimación – subestimación) respecto a una distribución normal de la variable (espacio isotrópico y homogéneo).

A estos factores, que no son sino reclasificaciones o adaptaciones lineales de las variables de la base de datos, se les han añadido otros cuyo origen está en el propio mapa de usos del suelo de referencia:

- Ponderación de la distancia al uso del suelo analizado en función de la alta potencialidad de transformación de las áreas contiguas (0 – intervalo superior a una determinada distancia, nula potencialidad, 255 – uso analizado, máxima potencialidad).
- Ponderación de las diferentes categorías de usos del suelo según la potencialidad de transformación en el uso analizado (0 – uso incompatible, nula potencialidad, 128 – uso compatible, potencialidad media, 255 – uso analizado, máxima potencialidad).

La [tabla 4](#) muestra, a modo de ejemplo, el conjunto de variables elegidas para la obtención del mapa de potencialidad de la categoría “bosque de coníferas” en los Garrotxes y los tratamientos realizados para la configuración de las restricciones (en este caso, límites de altitud e incompatibilidad de usos), y los factores (altitud, pendiente, orientación, criterios de accesibilidad, criterios de distancia al uso analizado y probabilidad de cambio).

Una vez elegidos y estandarizados los factores para cada categoría, se han calculado sus pesos o ponderaciones a partir de la matriz de pares de variables (Saaty, 1977), que es considerada como uno de los métodos más usuales para la obtención del eigenvector de cada factor. Previamente, se han obtenido diversos índices de asociación (Cramer's V, índice de correlación de Pearson) entre cada categoría de usos del suelo y cada uno de los factores, para conocer su mayor o menor correlación y facilitar de este modo la construcción de la matriz.

Por último, el tipo de evaluación multicriterio elegido (MCE-OWA, Multi-Criteria Evaluation – Order Weighted Average) (Eastman, 1993) incluye una serie de prioridades en función del nivel de riesgo (“andness”) y de compensación entre factores (“tradeoff”), habiendo optado por una compensación media y un riesgo bajo ([figura 3](#)).

El resultado de este proceso es una serie de mapas de potencialidad o probabilidad (0-255) para la localización de cada una de las categorías de usos del suelo, es decir, la capacidad de acogida del territorio, obtenidos a partir de la constatación de las relaciones entre las variables de la base de datos y los usos del suelo en 1987/1989. En la [figura 4](#) se presenta el mapa de potencialidad de la categoría “bosque de coníferas” en los Garrotxes, obtenido a partir de las restricciones, factores y ponderaciones recogidos en la [tabla 4](#), al que se le ha superpuesto mediante una trama la distribución real de dicho uso en la misma fecha.

2.3. Evaluación multiobjetivo (EMO) y cadenas de Markov acopladas a un algoritmo de automatismo celular

Los tratamientos anteriores (2.1. y 2.2.) confluyen finalmente en el módulo CA_MARKOV. En él se integra la modelización realizada por las cadenas de Markov a partir de la serie cronológica de usos del suelo, y los mapas de capacidad de acogida para cada uno de esos usos obtenidos según las variables de la base de datos (evaluación multicriterio), para asignar finalmente a cada píxel una categoría de ocupación del suelo (evaluación multiobjetivo) en la fecha proyectada. De esta manera, la modelización, al considerar las variables explicativas de índole natural o humana, mejora los resultados de aquélla obtenida tan sólo mediante la aplicación de las cadenas de Markov y la proyección estocástica, aunque integra sus cálculos.

Pero, además, otra de las aportaciones del módulo CA_MARKOV consiste en la aplicación de un algoritmo de automatismo celular (con filtro medio booleano 5x5), que mide la contigüidad local. El resultado es multiplicado por los mapas obtenidos en la fase de evaluación multicriterio, incrementando por ello la probabilidad de pertenecer a una categoría por vecindad. Es decir, se obtiene un resultado que integra el carácter espacial o la probabilidad condicionada también por el entorno local. De esta forma se elimina el efecto “picado de viruela” que se observaba en los mapas de proyección estocástica.

Los requerimientos necesarios para la aplicación de esta función son, por lo tanto, productos de los tratamientos anteriores: el mapa de usos del suelo de referencia utilizado para la aplicación de las cadenas de Markov (1987, Alta Alpjarra, y 1989, Garrotxes), la matriz de áreas

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44.
ISSN: 1578-5157

de transición (cadenas de Markov), y los mapas de capacidad de acogida del territorio para cada categoría de usos del suelo (evaluación multicriterio). Por último, es necesario indicar el número de iteraciones (que deben coincidir con los años de extrapolación para el cálculo de la proyección) y del tipo de filtro booleano para el análisis de contigüidad local.

El resultado final es la modelización para el año 2000 (basado en 1980 y 1989) en los Garrotxes ([figura 5](#)), y para el 2001 (basado en 1957 y 1987) en la Alta Alpjarra ([figura 6](#)), que, a diferencia de las obtenidas mediante la aplicación exclusiva de las cadenas de Markov y del algoritmo de proyección estocástica, contemplan la relación entre la ocupación del suelo y el conjunto de variables consideradas en la fase de evaluación multicriterio.

El análisis paralelo de las dos áreas de estudio permite evaluar el método utilizado y concretar sus ventajas y limitaciones. En concreto, en el caso de los Garrotxes ([figura 7](#)), la modelización lleva a un resultado muy próximo de la realidad en el 2000 para la categoría de bosque de coníferas. La superficie de frondosas está subestimada, mientras que las categorías de matorral subserial y de landas (tanto de genistas como de gramíneas) aparecen sobreestimadas. Esto es debido a la relativa estabilidad que sufren estas categorías entre 1980 y 1989, que contrasta con la rápida evolución hacia el bosque de frondosas manifestada entre esta última fecha y el año 2000. Por lo tanto, sería necesario ajustar el método precisando la evolución interna de cada categoría mediante la ampliación del número de las mismas a fin de responder mejor a la rápida dinámica vegetal que caracteriza esta comarca pirenaica.

Si bien las leyendas de usos del suelo son de naturaleza cualitativa, sí puede detectarse en la de los Garrotxes una disposición ordenada desde las categorías forestales o paisajes "cerrados", hasta los paisajes más "abiertos" que corresponden a las áreas agrícolas y urbanas. En efecto, la leyenda está adaptada a la fuerte y rápida dinámica vegetal observada desde hace casi dos siglos (la primera cartografía fiable data de 1826, Catastro napoleónico), y recorriendo sus categorías se pueden reconocer dos tendencias opuestas en la dinámica vegetal y en la influencia antrópica, según se avance hacia paisajes forestales o hacia paisajes más antropizados. En la [tabla 5](#), que recoge las cifras de la superposición entre la modelización y la ocupación real del suelo, se muestra que las cifras situadas en la esquina superior derecha de la diagonal (predicciones correctas) indican una proyección hacia paisajes más "abiertos", mientras que las cifras situadas en la esquina inferior izquierda modelizan paisajes más "cerrados", no habiéndose detectado estos procesos en la cartografía real del año 2000.

La [figura 8](#) muestra la cartografía de los aciertos y los desajustes entre la modelización y la ocupación real del suelo en los Garrotxes. La leyenda muestra las áreas bien modelizadas, que suponen un 72.87% del total y los principales errores en la proyección que, en total, ascienden al 27.13% de la superficie. Estos residuales, ateniéndonos a la disposición ordenada de la leyenda, han sido clasificados según la diferencia en número de categorías entre la modelización y la ocupación real del suelo en el 2000. Así, por ejemplo, un valor -1 puede deberse a que, si bien se ha proyectado una superficie de landas de gramíneas, la realidad corresponde a la categoría de prados ($5-6 = -1$). Por lo tanto, los valores negativos corresponden a una sobreestimación de la tendencia hacia los paisajes cerrados y el menor o mayor valor indica la intensidad del desajuste. Al contrario, un valor +1 puede provenir de una mala estimación del matorral cuando la realidad es un bosque de

frondosas ($3-2 = +1$), respondiendo los valores positivos, por lo tanto, a una sobreestimación de la tendencia hacia los paisajes abiertos. Analizando la leyenda, se puede observar que la mitad de los residuales (12.9% del total del área de estudio) corresponden al desajuste de una sola categoría. En otros casos (3% de la superficie total), los desajustes son debidos a hechos difícilmente previsibles, como incendios forestales o pastorales, o bien caída de árboles derribados por el viento, que provocan la deforestación de un sector muy extenso del área analizada.

Por categorías, es el matorral subserial el que presenta las mayores cifras de desajustes, lo que confirma su estado de transición entre las formaciones arbóreas y los dos tipos de landas. Lo más destacable es la superficie de matorral subserial que no ha progresado hacia el estado arbóreo, tal y como se estimaba. Este hecho puede explicarse no porque el ritmo real de regeneración vegetal sea menor que el proyectado, sino porque la evolución en el seno de la categoría no se manifiesta en los resultados. Así, los antiguos pastos abandonados sufren una regeneración vegetal intensa que, sin embargo, no permite modificar su denominación de matorrales subseriales. La incorrecta estimación en cantidad de superficie es debida, por lo tanto, a la aparente estabilidad de las mismas en el período considerado, que es la base para el análisis de las cadenas de Markov. En otro sentido, las landas compuestas por genistas y gramíneas sufren una cierta paralización en la dinámica vegetal por efecto del fuego pastoral o la propia actividad ganadera, proceso que explica su errónea estimación en la modelización.

En la Alta Alpujarra ([figura 9](#)), los desajustes en la modelización para el año 2001 corresponden a dos procesos bien distintos que rompen con las tendencias detectadas en el paisaje en décadas anteriores. Por una parte, la menor intensidad de las campañas de repoblación forestal en la última década conlleva una sobreestimación de la categoría de pinares de repoblación para el 2001, que es además muy explícita por afectar a las zonas colindantes con las antiguas masas repobladas. Un filtro de contigüidad menor del utilizado podría mitigar este efecto. En segundo lugar, el semi-abandono de la agricultura de regadío o la configuración de paisajes en mosaico con parcelas cultivadas y parcelas abandonadas son procesos que se han acelerado desde finales de los años ochenta, lo que impide su correcta estimación en la modelización y, como consecuencia, una sobreestimación de los usos agrícolas activos, especialmente los cultivos de regadío.

En la [tabla 6](#) se muestran bien estos procesos. Si bien el 98.06% de los pinares de repoblación del mapa real de 2001 están bien estimados, entre un 10 y un 15% de las superficies de formaciones arbóreas, matorrales, pastizales, cultivos abandonados y mosaico de cultivos de regadío/secano se proyectan como pinares de repoblación. Por su parte, tan sólo un 6.36% de los cultivos semi-abandonados coinciden con la proyección, estimándose un 62.45% como cultivos de regadío todavía activos.

La [figura 10](#) presenta cartográficamente la valoración de la proyección. Un 77.61% de la superficie de la Alta Alpujarra está bien estimada, mientras que un 22.39% presenta desajustes, habiendo sido clasificados éstos según la superficie sobreestimada de cada categoría. De los residuales, los que ocupan una mayor superficie son los que corresponden a la sobreestimación de los pinares de repoblación (9.71% del total de la superficie), que se ubican fundamentalmente en los límites contiguos a las antiguas zonas repobladas, por efecto del filtro booleano de vecindad, y también en aquellos enclaves donde se produjeron incendios forestales en décadas pasadas. El

segundo proceso es la sobreestimación de cultivos de regadío (4.77% de la superficie total), que afecta especialmente a las laderas abancaladas situadas en torno a los núcleos de población, puesto que se asiste en la actualidad a una situación generalizada de semi-abandono. El proceso inverso se detecta en otros ámbitos, especialmente los ligados a los cultivos del olivar en regadío o a la puesta en marcha de nuevos cultivos herbáceos, puesto que si bien se estima el abandono o semi-abandono de algunos sectores (sobreestimación de un 1.89% de superficie para cada categoría), la actividad de esta agricultura se mantiene en el año 2001.

Con un 2.82% de la superficie total, la sobreestimación del matorral indica que la regeneración de la cubierta vegetal, principalmente en las áreas de cultivos abandonados y en mosaico, no es un proceso tan rápido como el que proyecta la modelización, al igual que ocurre con el 0.91% de superficie sobreestimada de frondosas, como evolución desde el matorral y los cultivos abandonados. Por último, un 0.41% corresponde a la sobreestimación del resto de las categorías, algunas poco significativas en superficie respecto al total (usos urbanos, secanos, mosaico de secano-regadío).

3. Conclusiones acerca de la aplicación del método prospectivo

La puesta en práctica del método de modelización espacio-temporal basado en las cadenas de Markov y otras funciones incluidas en los Sistemas de Información Geográfica ráster, y el hecho de haber realizado el estudio paralelo de dos ámbitos, comparables, pese a su diferente dinámica, permiten extraer las principales conclusiones. Puesto que en las líneas anteriores se han comentado los resultados concretos y los aciertos o desajustes en la modelización, en este apartado realizaremos una breve reflexión y síntesis sobre las principales dificultades encontradas a lo largo del proceso.

En primer lugar, habría que indicar que la modelización mediante las cadenas de Markov contempla una evolución lineal de la dinámica de los usos del suelo. Este hecho, como se comentó anteriormente, puede resultar incompatible con la propia evolución del paisaje, de tal manera que los cambios de ritmo, la desaparición o la nueva aparición de procesos de ocupación del suelo, no quedan reflejados en la modelización y constituyen los principales errores en los valores estimados. Parece evidente, por lo tanto, que un método que contemple evoluciones no lineales, se ajustará más adecuadamente a la dinámica paisajística de las áreas de estudio, afectadas por transformaciones de muy diverso origen y cadencia temporal a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. Este hecho no anula sin embargo la validez de los resultados, puesto que los desajustes o residuales de la modelización ponen de manifiesto las principales tendencias de cambio y las clasifica según su ritmo de evolución, diferenciando aquéllas que siguen una tendencia lineal (superficies bien estimadas) de aquéllas que se ven afectadas por otros procesos externos (superficies mal estimadas), lo que permite el análisis de sus causas.

En este sentido, en los Garrotxes se asiste a una dinámica del paisaje más relacionada con la regeneración natural de la vegetación y con una tendencia hacia los paisajes cerrados (abandono casi definitivo de la agricultura, progresión vegetal desde las landas hacia el matorral subserial y hacia las formaciones arbóreas), lo que se adapta mejor a una estimación o modelización de tipo

lineal, a pesar del ritmo más intenso detectado en la última década. Los principales desajustes son producto en gran medida de fenómenos no previsibles, como los incendios forestales o la deforestación debida a inclemencias meteorológicas. En la Alta Alpujarra, los dos grandes procesos que explican la mayor parte de los residuales (repoblación forestal y el proceso relativamente reciente de semi-abandono que caracteriza buena parte de los bancales de regadío de origen árabe), no responden a una evolución lineal, lo que impide su correcta estimación en la modelización. Por otra parte, y al contrario de lo que ocurría en los Garrotxes, la regeneración vegetal presenta un ritmo de crecimiento menor del estimado en la proyección.

Otra cuestión ya comentada es la necesidad de contar con las mismas categorías en la serie temporal cartografiada, lo que ha obligado, en el caso de la Alta Alpujarra, a realizar la modelización del año 2001 a partir de 1957 y 1987, es decir, con un salto temporal de 30 años. Aunque teóricamente esta limitación no impide el cálculo, es la principal causa de que exista una sobreestimación importante de la categoría de pinares de repoblación. Efectivamente, las principales campañas de repoblación tuvieron lugar en las citadas décadas, por lo que la modelización lineal prevé un aumento en la misma proporción, lo que no tuvo lugar en la realidad entre el año 1987 y el 2001.

A estos hechos se añade un límite inherente a la propia categorización de la ocupación del suelo. La transición y transformaciones entre diferentes categorías, como es el caso del matorral subserial y el bosque de frondosas en los Garrotxes, o las categorías de cultivos abandonados, matorrales y formaciones arbóreas en la Alta Alpujarra, no quedan bien reflejadas en la serie cronológica, de tal forma que la ausencia de cambio de categoría no tiene por qué significar estabilidad, sino una evolución en el seno de dicha categoría. Una subdivisión y matización de las mismas podría solucionar alguno de los casos más conflictivos. Por otra parte, la inclusión de una categoría mixta o de transición, como la denominada "mosaico de cultivos abandonados/ no abandonados", muestra de la compleja situación de buena parte de las áreas agrícolas de la Alta Alpujarra, lleva implícita una alta probabilidad de error en la estimación.

Respecto a las ventajas de la utilización de la evaluación multicriterio de cada categoría junto al análisis de las cadenas de Markov (2.3.), cabe decir que los resultados son más acordes con la realidad que aquéllos obtenidos tan sólo con este algoritmo y la proyección estocástica (2.1). Estas proyecciones expresaban con mayor intensidad la evolución lineal del paisaje, haciendo desaparecer o disminuir drásticamente la superficie de algunas categorías (secanos, mosaico de regadío-secano y cultivos semi-abandonados en la Alta Alpujarra, y landas de gramíneas y cultivos en los Garrotxes). La principal aportación de la EMC es considerar la capacidad del territorio para acoger un determinado uso y no sólo el propio ritmo temporal de esos usos, de tal manera que su distribución en la modelización se atiene más a las variables humanas y físicas que los condicionan y explican.

De hecho, la cartografía proyectada mediante CA_MARKOV y la cartografía real presentan un índice de asociación (Cramer's V) de 0.69 en los Garrotxes y de 0.75 en el caso de la Alta Alpujarra, frente al 0.62 de los Garrotxes y 0.69 de la Alta Alpujarra como resultado de la aplicación exclusiva de las cadenas de Markov y la proyección estocástica. Es necesario indicar, sin embargo, que la correlación es variable en función de cada categoría de ocupación del suelo. Este

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44.
ISSN: 1578-5157

hecho parece estar ligado tanto al tipo de uso del suelo como a los factores tomados en consideración, que presentan un grado de predicción diferente y específico para cada categoría.

Además, el problema puede derivarse de la inclusión de variables poco significativas o de la ausencia de otras, lo que provoca una incorrecta o insuficiente modelización de la capacidad de acogida del territorio para alguna categoría y la existencia de errores de localización o distribución espacial. En este sentido, somos conscientes de que las variables cartografiadas que integran la base de datos pueden ser explicativas o descriptivas de los usos del suelo, pero no abarcan la complejidad de su dinámica y las causas de la misma. Este hecho influye menos en el caso de las unidades de vegetación natural, pero puede llegar a ser un obstáculo importante en la estimación de las categorías más dependientes de otras coyunturas externas. Conociendo estas limitaciones, las variables han intentado responder a las principales características orográficas, litológicas, edafológicas o bioclimáticas que puedan ayudar a la localización de un determinado uso del suelo, pero también se han incluido otras que atañen a la accesibilidad (distancia a núcleos urbanos o vías de comunicación) o a la distancia respecto a la infraestructura hidráulica, más adecuadas para modelizar procesos como el abandono agrícola. Además, en muchas de las categorías, sobre todo en los casos de progresión natural de la vegetación, se ha considerado la distancia al propio uso como factor de contigüidad que influye en una mayor aptitud.

Una dificultad añadida procede de la falta de conexión entre el factor temporal (serie cronológica de los usos del suelo) y el conjunto de variables explicativas, puesto que éstas han sido puestas en relación con los usos del suelo en una fecha concreta y estática. Para paliar este problema, se han considerado las dos fechas anteriores a la proyección (1980 y 1989 en los Garrotxes, 1957 y 1987 en la Alta Alpjarra), y no sólo la más reciente, para obtener un factor que expresa la probabilidad de cambio de cada píxel. La aptitud máxima para cada categoría se localiza en aquellas áreas que no sufren transformación entre ambas fechas, lo que mejora el resultado final de la evaluación multicriterio.

Por último, cabe comentar que, si bien el filtro de contigüidad o booleano incluido en el módulo CA_MARKOV anula el efecto "picado de viruela" de la proyección estocástica, es decir, disminuye la distribución aleatoria, no conviene en el caso de categorías que no se ven afectadas en su dinámica por el efecto de vecindad, por lo que sería conveniente, en estos casos, la utilización de una matriz de menor intensidad en el cálculo.

Referencias bibliográficas

- Barredo Cano, J. y Bosque Sendra, J. (1995): "Integración de evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica para la evaluación de la capacidad de acogida del territorio y la asignación de usos del suelo". *IV Congreso Español de Sistemas de Información Geográfica*. Barcelona, AESIG.
- Barredo Cano, J. I. (1996): *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Madrid, Rama.
- Bishop, C. M. (1994): *Neural network for pattern recognition*. Oxford, Oxford University Press.

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44.
ISSN: 1578-5157

Camacho Olmedo, M. T., Paegelow, M. y Menor Toribio, J. (2000): "Límites y aportaciones de los Sistemas de Información Geográfica para trazar la dinámica espacio-temporal del paisaje en áreas montañosas mediterráneas", en Aguado, I. y Gómez, M. (Ed.): *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*. Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá de Henares, pp. 381-401.

Cardot, H., Ferraty, F. y Sarda, P. (1999): "Functional linear model", *Stat. & Proba. Lett.*, 45, pp 11-22.

Carver, S. J. (1991): "Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems", *International Journal of Geographical Information Systems*, 5, pp 321-339.

Eastman, J. R. (1993): *IDRISI, A grid based geographyc analysis system*, Version 4.1. Massachusetts, Clark University.

Eastman, J. R., Kyrem, P. A. K., Toledano, J. y Jin, W. (1993): "A procedure for multi-objective decision making in GIS under conditions of competing objectives", *Proceedings of EGIS'93*, pp 438-447.

Eastman, J. R., Kyem, P. A. K., Toledano, J. y Jin, W. (1993): *Explorations in Geographic Systems Technology. Volume 4: GIS and Decision Making*. Geneva, Switzerland, UNITAR.

Goodchild, M. F. y Gopal, S. (Eds.) (1989): *Accuracy os spatial databases*. Londres, Taylor and Francis.

Paegelow, M. y Camacho Olmedo, M. T. (1997): "Dynamique spatio-temporelle de l'utilisation du sol en milieu montagnard méditerranéen. Etude comparative des Garrotxes (Pyrénées Orientales, France) et du Poqueira (Sierra Nevada, Espagne)", en Barrue-Pastor, M. y Bertrand, G. (Ed.): *Le temps de l'environnement*. Toulouse, Presses Universitaires du Mirail, CD-ROM.

Saaty, T. L. (1977): "A scaling method for priorities in hierarchical structures", *Journal of Mathematical Psychology*, 15, pp 234-281.

Santos Preciado, J. M. y Borderías Uribeondo, M. P. (2001): *Introducción al análisis medioambiental de un territorio*. Madrid, Universidad Nacional de Educación a Distancia.

VVAA (2001): *Guide to GIS and Image Processing, vol.2. Idrisi 32*. Massachusetts, Clark University.

TABLAS

Tabla 1. Matriz de probabilidades de transición entre categorías de ocupación del suelo (1989-2000). Garrotxes

	2000 (%)									Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	1989(%)
1989 (%)	1	92.66	0.55	4.74	0.73	0.49	0.81	0.01	00.00	100.00
	2	2.84	73.96	17.36	4.38	0.51	0.95	0.01	00.00	100.00
	3	20.21	4.00	53.38	11.97	9.17	1.19	0.07	00.00	100.00
	4	1.98	2.52	16.04	67.90	9.88	1.56	0.11	00.00	100.00
	5	4.89	0.31	8.24	50.82	35.64	0.03	0.07	00.00	100.00
	6	9.64	1.39	16.54	2.65	4.14	64.85	0.79	00.00	100.00
	7	3.28	0.53	12.43	16.71	8.67	56.88	1.51	00.00	100.00
	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00

Categorías: 1: bosque de coníferas, 2: bosque de frondosas, 3: matorral subserial, 4: landas (genistas), 5: landas (gramíneas), 6: prados, 7: cultivos, 8: usos urbanos

Fte. elaboración propia

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44.
ISSN: 1578-5157

Tabla 2. Matriz de probabilidades de transición entre categorías de ocupación del suelo (1987-2001). Alta Alpujarra

	2001 (%)											Total
1987 (%)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1987(%)
	1	83.77	00.73	02.42	12.61	00.00	00.00	00.47	00.00	00.00	00.00	100.00
	2	01.46	79.94	00.28	17.75	00.01	00.00	00.18	00.00	00.00	00.30	100.00
	3	02.54	00.03	84.76	12.05	00.00	00.00	00.62	00.00	00.00	00.00	100.00
	4	00.00	17.08	01.31	80.31	01.29	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	100.00
	5	00.45	12.85	00.34	14.82	71.47	00.00	00.07	00.00	00.00	00.00	100.00
	6	00.00	63.51	01.04	00.00	35.44	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	100.00
	7	02.05	00.00	02.32	00.20	04.28	17.84	73.16	00.00	00.00	00.11	100.00
	8	00.31	00.00	00.44	00.00	35.28	22.62	00.07	41.17	00.00	00.11	100.00
	9	11.42	00.00	00.00	00.00	64.32	00.00	06.12	00.00	18.14	00.00	100.00
10	00.00	16.65	00.00	00.00	00.01	00.00	00.00	00.00	00.00	83.34	100.00	

Categorías: 1: formaciones arbóreas, 2: matorrales, 3: pastizales, 4: pinares de repoblación, 5: cultivos abandonados, 6: mosaico de cultivos abandonados/no abandonados, 7: cultivos de regadío, 8: cultivos de secano, 9: mosaico de regadío-secano, 10: uso urbano, minas y canteras, ramblas

Fte. Elaboración propia

Tabla 3. Variables de la base de datos espacial. Alta Alpujarra

Ficheros/mapas de origen	Función para la obtención de mapas derivados	Descripción
Modelo Digital del Terreno 1:25000 (IGN)	-	Altitudes
	Cálculo de pendientes	Pendiente en grados
	Cálculo de orientaciones	Orientaciones en grados
Base de Datos Digital 1:25000 (IGN)	Cálculo de distancias	Distancia a los núcleos de población
	Cálculo de distancias y ponderación	Distancia a vías asfaltadas (0.6) y no asfaltadas (0.4)
	Cálculo de distancias	Distancia a la red de acequias
Mapas temáticos		Unidades litológicas
		Unidades geomorfológicas
		Unidades edafológicas
		Pisos bioclimáticos
		Serie de Vegetación Potencial
		Existencia/ ausencia de terrazas de cultivo

Fte. Elaboración propia

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157

Tabla 4. EMC de la categoría "bosque de coníferas" en 1989. Garrotxes

Restricciones	Fichero de origen	Función aplicada	Descripción
1º	Usos del suelo 1989	Reclasificación	0 = fondo de la imagen y usos urbanos
2º	Altitudes	Reclasificación	0= <1000 m y >2400 m
Factores (Ponderaciones)	Fichero de origen	Función aplicada	Descripción
1º (13.05%)	Altitudes	Reclasificación	Ponderación según distribución normal (nivel de confianza 99% y 99.9%)
2º (5.25%)	Pendientes	Reclasificación	Ponderación según distribución normal (Idem)
3º (7.77%)	Orientaciones	Reclasificación	Ponderación según distribución normal (Idem)
4º (7.48%)	Accesibilidad	Reclasificación	Ponderación según distribución normal (Idem)
5º (33.22%)	Usos del suelo 1989	Cálculo de distancias y ponderación mediante lógica difusa (Fuzzy, j-shaped, simétrica)	Ponderación según distancia (-0.1, 0, 100 y 400 metros) al bosque de coníferas
6º (33.22%)	Probabilidad de cambio	Superposición de capas y reclasificación	Producto cartesiano entre fechas y ponderación según distancias

Fte. Elaboración propia

Tabla 5. Matriz de la superposición entre los usos del suelo en 2000 y su predicción para la misma fecha según CA_MARKOV. Garrotxes

CA_MARKOV 2000 (%)										Total Usos 2000 (%)
Usos 2000 (%)		1	2	3	4	5	6	7	8	
	1	87.25	0.26	7.45	1.99	1.63	1.42	0.01	0.00	100.00
	2	9.38	44.24	35.81	4.85	3.78	1.87	0.06	0.00	100.00
	3	17.02	3.34	47.01	12.09	13.03	7.25	0.27	0.00	100.00
	4	1.82	0.89	7.25	82.10	7.47	0.43	0.04	0.00	100.00
	5	4.45	0.12	5.88	41.97	47.57	0.00	0.00	0.00	100.00
	6	13.62	0.33	13.95	0.15	4.88	66.05	1.03	0.00	100.00
	7	0.00	0.00	12.50	25.00	0.00	62.50	0.00	0.00	100.00
	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00

Categorías: 1: bosque de coníferas, 2: bosque de frondosas, 3: matorral subserial, 4: landas (genistas), 5: landas (gramíneas), 6: prados, 7: cultivos, 8: usos urbanos

Fte. Elaboración propia

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44.
ISSN: 1578-5157

Tabla 6. Matriz de la superposición entre los usos del suelo en 2001 y su predicción para la misma fecha según CA_MARKOV. Alta Alpujarra

CA_MARKOV 2001 (%)												Total Usos 2001 (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Usos 2001 (%)	1	85.72	0.35	0.00	11.72	0.89	0.00	1.32	0.00	0.00	0.00	100.00
	2	1.08	84.77	0.27	13.05	0.51	0.00	0.16	0.04	0.00	0.12	100.00
	3	1.06	0.05	87.49	11.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	4	0.13	1.80	0.00	98.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	5	0.85	11.78	1.08	11.84	65.97	2.77	5.43	0.00	0.26	0.00	100.00
	6	1.43	10.83	0.02	3.76	14.96	6.36	62.45	0.00	0.00	0.16	100.00
	7	1.94	6.89	0.00	0.17	3.58	24.94	61.06	1.26	0.00	0.16	100.00
	8	0.49	5.20	0.00	0.00	34.04	9.32	0.00	50.71	0.00	0.24	100.00
	9	5.06	0.85	0.00	13.68	55.02	0.00	14.18	0.00	11.19	0.00	100.00
	10	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	1.57	0.00	0.00	98.03	100.00

Categorías: 1: formaciones arbóreas, 2: matorrales, 3: pastizales, 4: pinares de repoblación, 5: cultivos abandonados, 6: mosaico de cultivos abandonados/no abandonados, 7: cultivos de regadío, 8: cultivos de secano, 9: mosaico de regadío-secano, 10: uso urbano, minas y canteras, ramblas

Fte. Elaboración propia

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

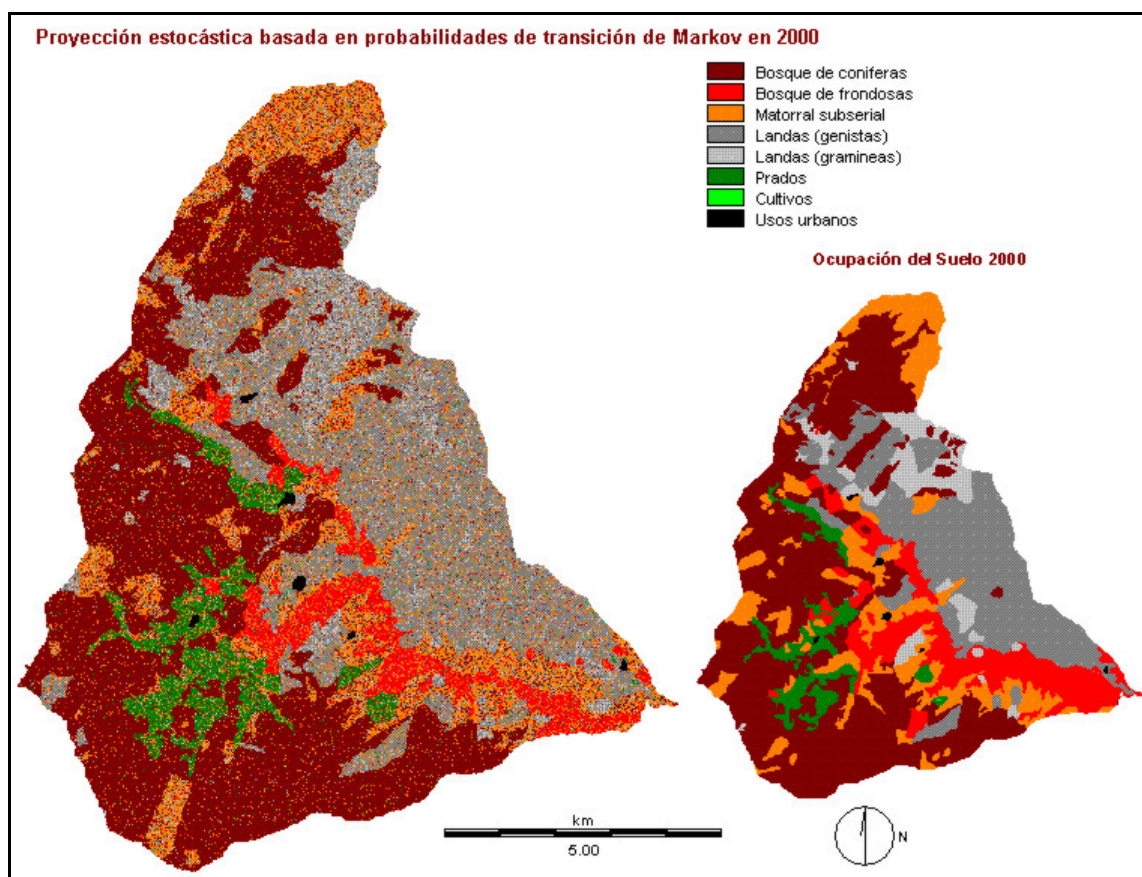


Figura 1. Proyección estocástica en 2000 (basado en 1980 y 1989) y ocupación real del suelo en 2000. Garrotxes

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157

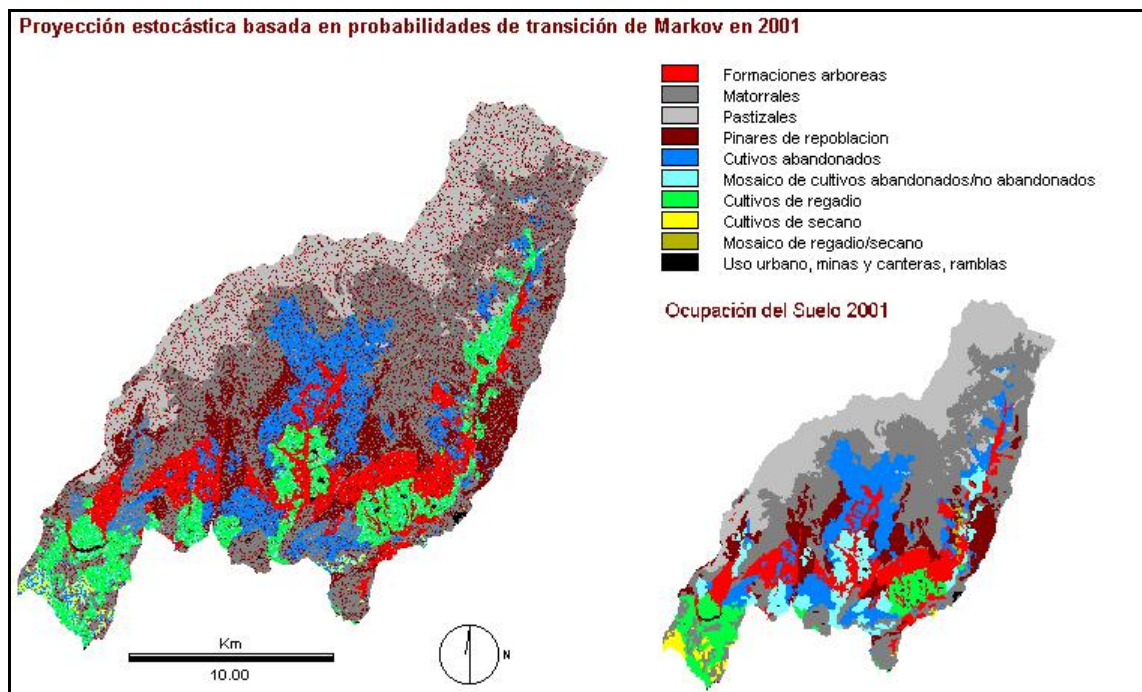


Figura 2. Proyección estocástica en 2001 (basado en 1957 y 1987) y ocupación real del suelo en 2001. Alta Alpujarra

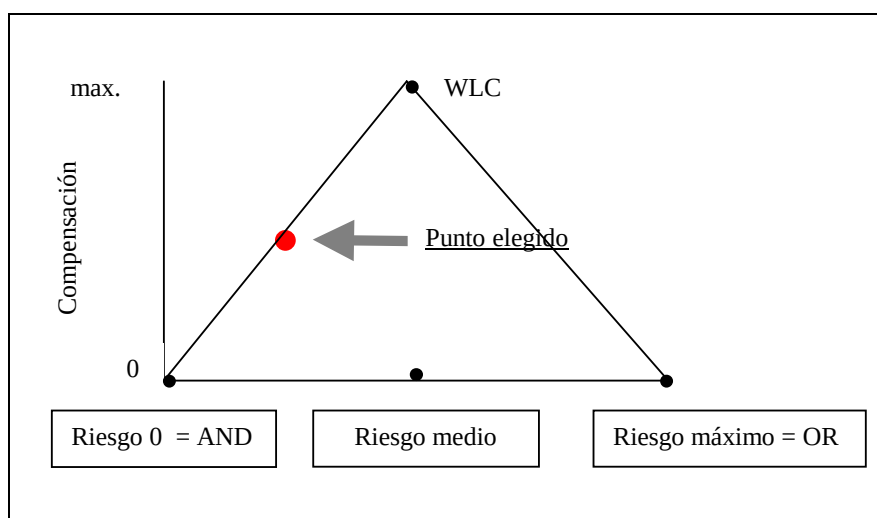


Figura 3. Aproximación EMC-OWA elegida según el riesgo ("andness") y la compensación entre factores ("tradeoff")

Fte. Elaboración propia a partir de figuras incluidas en "Guide to GIS and Image Processing, vol.2. Idrisi 32", 2001.

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157

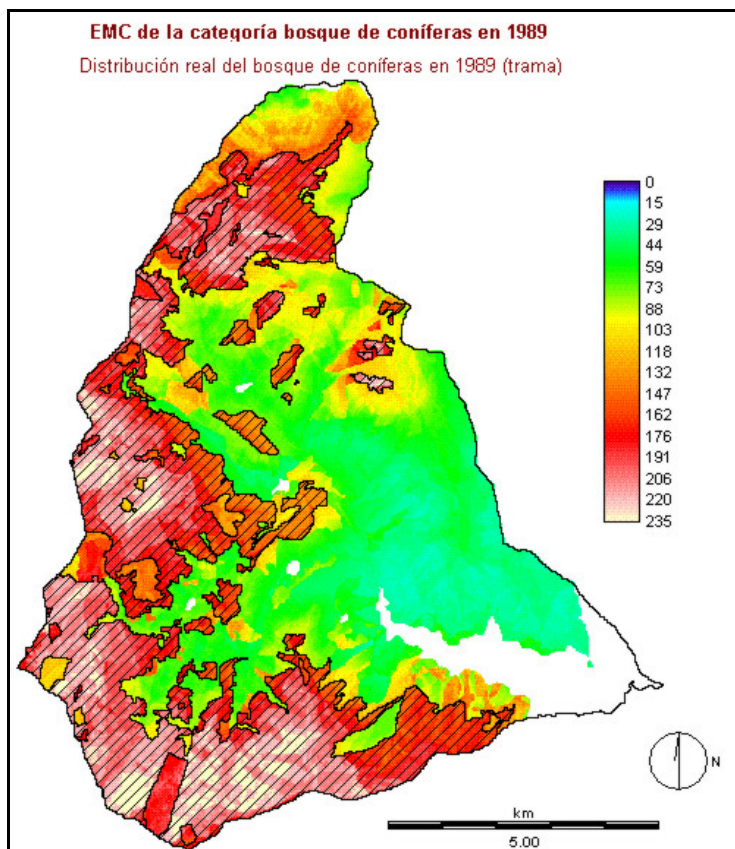


Figura 4. Mapa de potencialidad de la categoría "bosque de coníferas" en 1989 y ocupación real para la misma fecha. Garrotxes

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157

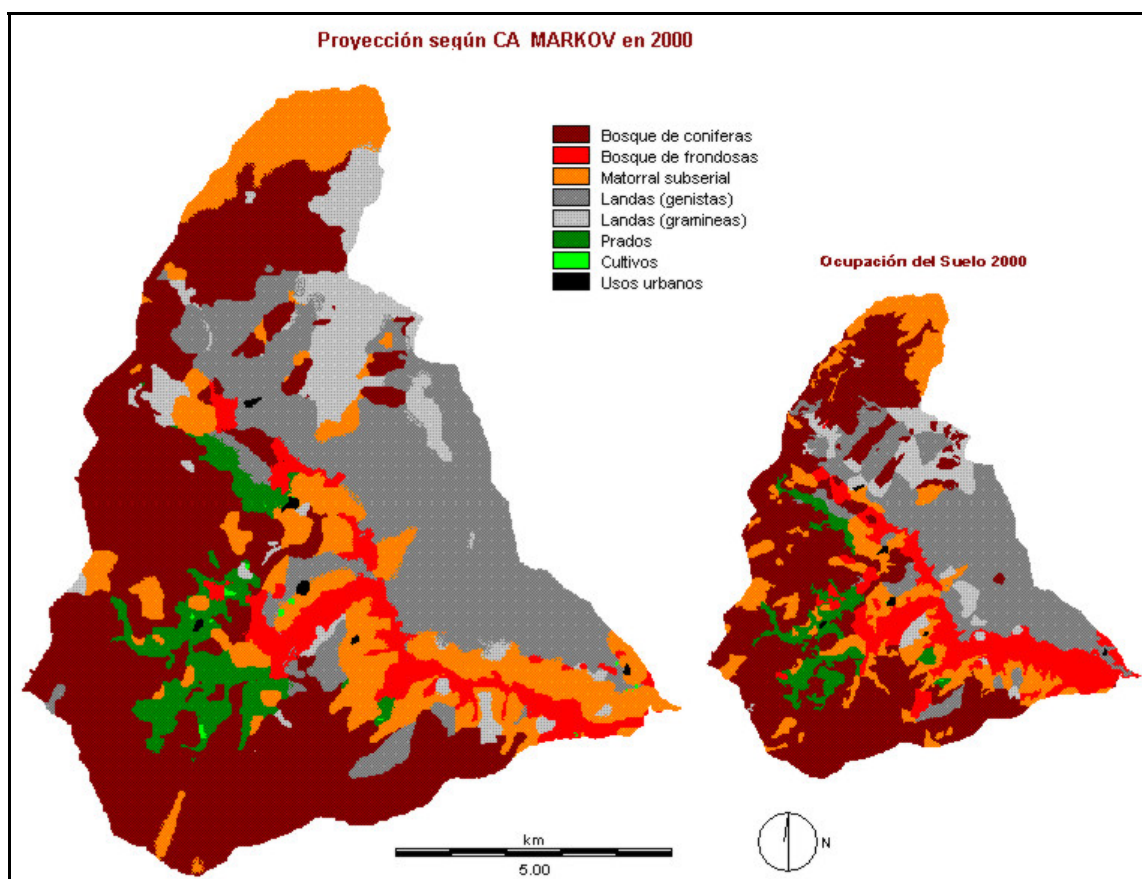


Figura 5. Proyección según CA_MARKOV en 2000 (basado en 1980 y 1989) y ocupación real del suelo en 2000. Garrotxes

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157

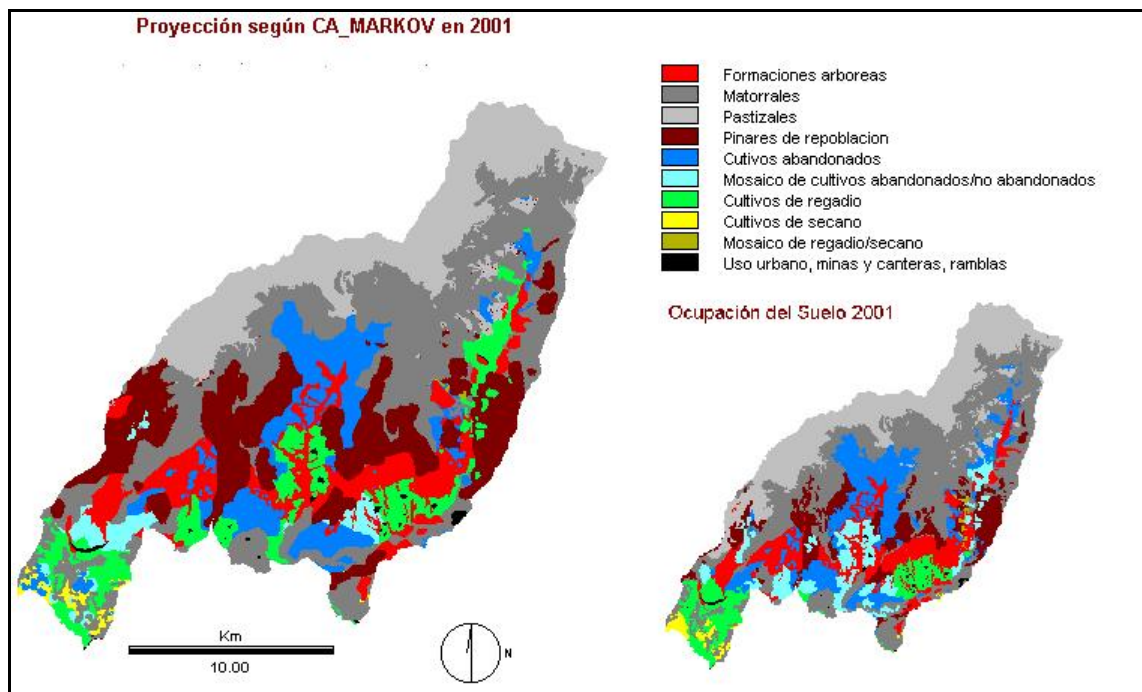


Figura 6. Proyección según CA_MARKOV en 2001 (basado en 1957 y 1987) y ocupación real del suelo en 2001. Alta Alpujarra

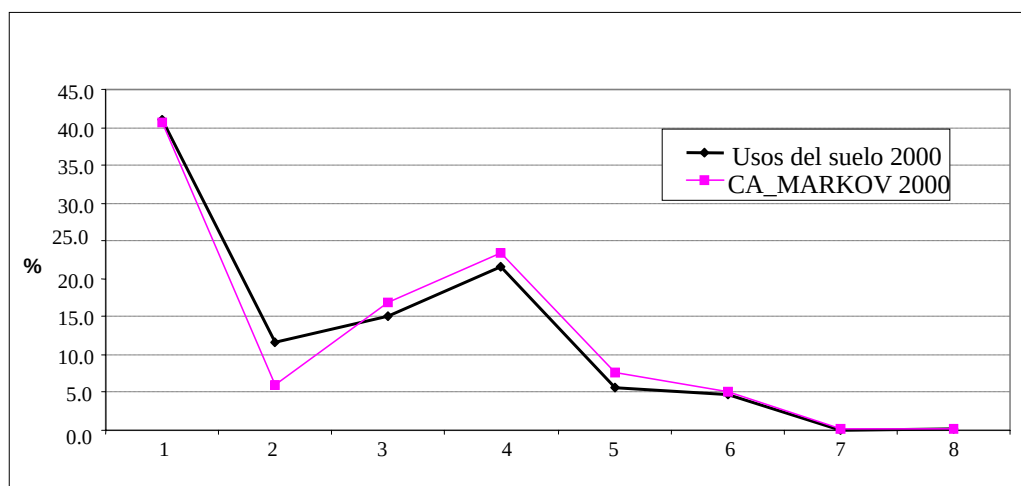


Figura 7. Comparación entre los usos del suelo en 2000 y su predicción para la misma fecha según CA_MARKOV. Garrotxes

Categorías: 1: bosque de coníferas, 2: bosque de frondosas, 3: matorral subserial, 4: landas (genistas), 5: landas (gramíneas), 6: prados, 7: cultivos, 8: usos urbanos

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157

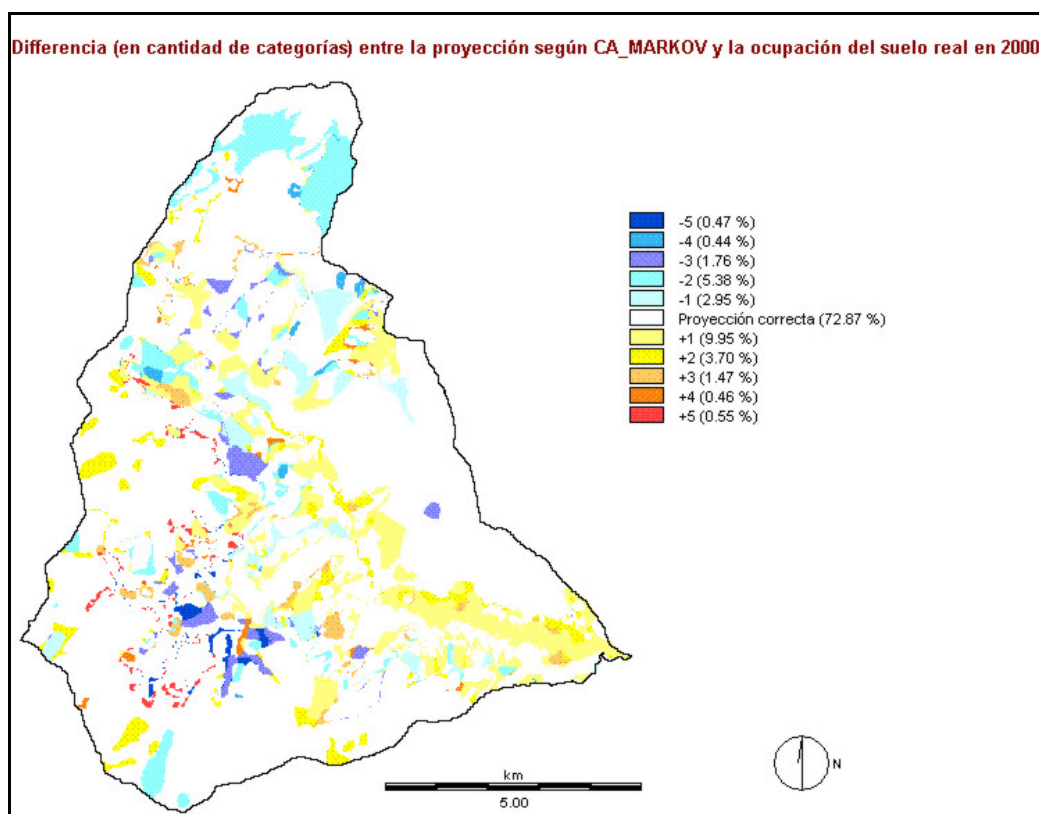


Figura 8 Valoración de la proyección según CA_MARKOV en 2000. Garrotxes

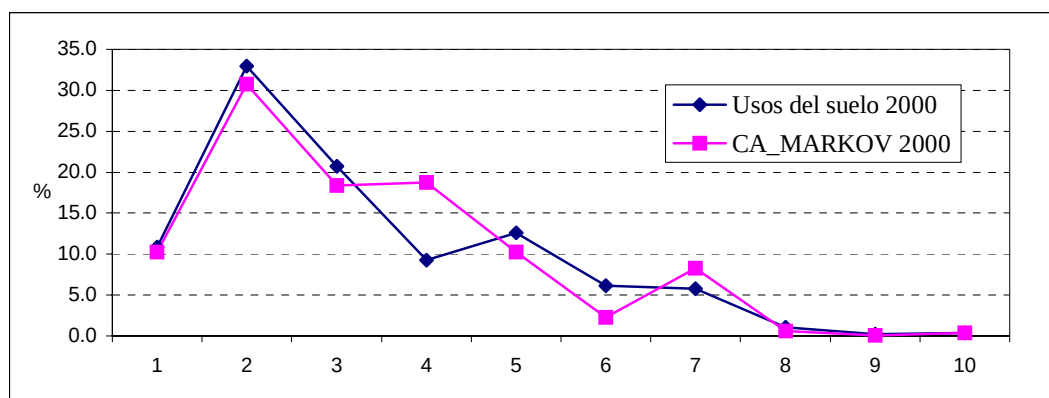


Figura 9. Comparación entre los usos del suelo en 2001 y su predicción para la misma fecha según CA_MARKOV. Alta Alpjarra

Categorías: 1: formaciones arbóreas, 2: matorrales, 3: pastizales, 4: pinares de repoblación, 5: cultivos abandonados, 6: mosaico de cultivos abandonados/no abandonados, 7: cultivos de regadío, 8: cultivos de secano, 9: mosaico de regadío-secano, 10: uso urbano, minas y canteras, ramblas

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 (Artículos)*, nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157

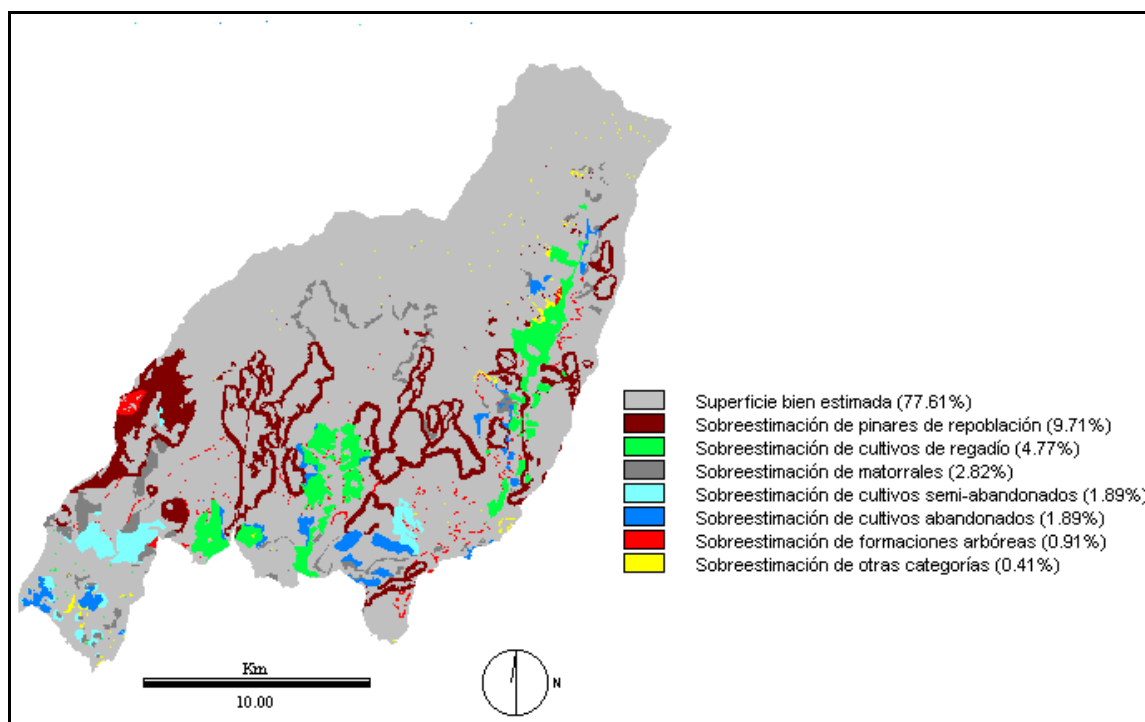


Figura 10. Valoración de la proyección según CA_MARKOV en 2001. Alta Alpujarra

¹ “Dynamiques et modélisations de l’occupation du sol appliquées aux anthroposystèmes montagnards méditerranéens: Pyrénées – Sierra Nevada”, Programme Environnement, Vie et Sociétés, C.N.R.S., Francia.