

Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile¹

Cristián Henríquez², Gerardo Azócar³, Mauricio Aguayo³

²Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. E-mail: cghenriq@uc.cl

³Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción. E-mail: maaguayo@udec.cl; gazocar@udec.cl

RESUMEN

Mediante el desarrollo de un modelo de simulación espacial del cambio de uso del suelo, se evalúa y simula el cambio en el coeficiente de escorrentía superficial para la ciudad de Los Ángeles y sus alrededores, VIII Región del Biobío, para el período 1998-2022. El modelo se ha desarrollado en el SIG Idrisi Kilimanjaro, integrando los métodos de Cadenas de Markov, Evaluación Multi Criterio y Autómatas Celulares. La evaluación del coeficiente de escorrentía se basa en el método del Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos. Los resultados abren importantes perspectivas para usar este tipo de herramienta de análisis espacial en la evaluación de impacto ambiental desde una óptica geográfica.

Palabras clave: evaluación ambiental, simulación espacial, Sistemas de Información Geográfica

ABSTRACT

Through development of a spatial simulation model of the land use change it is evaluated and predicted the increase of the surface runoff coefficient in Los Angeles city, Biobío region, between years 1998 and 2022. The model has been developed in the SIG Idrisi Kilimanjaro integrating Markov Chains, Multi-Criteria Evaluation and Cellular Automata. The assessment of the surface runoff coefficient is based on the method of USSCS. The use of spatial models represents a powerful tool to analyze the environmental effects of the urban development, from a geographic approach.

Key words: environmental assessment, spatial simulation, Geographic Information Systems

Los modelos de cambio de uso se han transformado en una poderosa herramienta de análisis espacial orientada, principalmente, a los siguientes aspectos: (a) Explorar los variados mecanismos que fuerzan los cambios de uso del suelo y las variables sociales, económicas y espaciales que conducen a esto; (b) Proyectar los potenciales impactos ambientales y socioeconómicos derivados de los cambios en el uso del suelo, y; (c) Evaluar la influencia de alternativas políticas y regímenes de manejo sobre los patrones de desarrollo y uso del suelo (Aguayo et al., 2006).

Los modelos de cambio de uso del suelo usan parámetros simples, incluyendo la extensión de las actuales áreas urbanas, las principales vías de transporte, la distancia a los mercados de trabajo, bienes e insumos, las condiciones topográficas y la existencia de tierras en situación especial (i.e. áreas protegidas, zonas de drenaje). El foco principal en el esfuerzo de la modelación, es la identificación de los factores físicos y socioeconómicos que determinan o condicionan la presión sobre el cambio de uso del suelo en un territorio determinado.

Dos aproximaciones prevalecen en la modelación de patrones espaciales de los cambios de uso del suelo: (a) Modelos basados en regresión, y (b) Modelos en base a transición espacial. Los primeros establecen relaciones entre un amplio rango de variables predictivas y las probabilidades de cambio de uso del suelo. La influencia de estos factores locales sobre el cambio de uso es tradicionalmente modelada con la función de decaimiento de distancia, donde la influencia decrece con el incremento de esta medida (Theobald y Hobbs, 1998; Weng, 2002). Generalmente, en la modelación en base a regresión se han usado aproximaciones lineales, como la regresión logística, no lineales, vinculadas a redes neuronales, y modelos aditivos generalizados (Pijanowski et al., 2005).

El objetivo de estos modelos es establecer relaciones funcionales entre un conjunto de variables debidamente espacializadas que, posteriormente, son usadas para estimar la localización de los cambios sobre el paisaje. Los valores de las variables y los casos reales de cambio de uso del suelo son normalmente observados a partir de datos históricos obtenidos desde imágenes satelitales o fotografías aéreas verificadas en terreno. El valor de los modelos de regresión es la fácil obtención de la contribución relativa de diferentes variables, que permiten pronosticar un determinado cambio de uso del suelo. Debido a la naturaleza espacial de muchas de las variables de entrada, la integración con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es esencial ya que permite un manejo y análisis espacialmente explícito de los datos asociado al modelo (Qi y Wu, 1996; De Koning et al., 1999). En este sentido, los SIGs son un aporte en: (a) La construcción de variables de entrada para la modelación; (b) La identificación de patrones espaciales en los datos; (c) La cuantificación de los cambios temporales observados o predichos; (d) La evaluación de factores que operan cruzando una variedad de escalas, y; (e) La visualización de los resultados.

Por otro lado, los modelos basados en transición espacial comprenden, principalmente, las técnicas estocásticas basadas en el método de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares (AC) (Zhou y Liebhold, 1995; Pontius y Malanson, 2005). Estos modelos asumen explícitamente que las áreas vecinas influyen en la probabilidad de transición del área o celda central. Las investigaciones que emplean esta aproximación discuten la tradicional función de decaimiento de distancia. En particular, ellos cuestionan el supuesto de equilibrio y precisan que la complejidad que suponen los modelos basados en regresión es despejada como ruido (Aguayo et al., 2006). Los AC incorporan reglas simples acerca de los efectos de adyacencia espacial que gobiernan la dinámica del sistema y que dan lugar a patrones de comportamientos emergentes

que son usualmente más complejos que aquellos generados por simples modelos de equilibrio.

En Chile, ejemplos de aplicaciones de AC y matrices de Markov, corresponden a la modelación espacio-temporal de sequías hidrológicas a nivel regional (De la Cuadra y Fernández, 2001) y modelación de cambios de uso de suelo en la comuna rural de Ninhue, VIII Región del Biobío (Ramírez, 2003), respectivamente. A nivel urbano se ha aplicado un método integrado de AC, Cadenas de Markov y Evaluación Multi Criterio (EMC) en las ciudades de Chillán y Los Ángeles (Henríquez et al., 2006). Mientras que Aguayo et al. (2006), ha estudiado los factores de crecimiento de la ciudad de Los Ángeles usando un modelo de regresión logística.

Según Brown et al. (2002), para que los modelos predictivos se transformen en una herramienta útil es necesario que representen de manera eficaz: (a) La magnitud de los cambios; (b) La localización de los futuros cambios, y; (c) Los patrones espaciales de estos cambios. Aunque diversos modelos tratan las tres condiciones, pocos modelos están orientados específicamente a representar los patrones espaciales de los cambios de uso y coberturas del suelo como entrada para un modelo de evaluación de impacto ambiental de carácter predictivo. La representación de los patrones espaciales de los cambios proyectados por los modelos es de gran importancia, debido a que esta es la única manera de evaluar y proyectar con mayor precisión las consecuencias ambientales de los efectos del crecimiento urbano futuro en la periferia. En este contexto sería posible dimensionar los impactos en la pérdida de suelo agrícola, fragmentación del hábitat o cambios en la escorrentía superficial, aspecto que se desarrollará como ejemplo en esta investigación en la ciudad de Los Ángeles.

Para este propósito el trabajo se ha estructurado en cinco partes; la primera referida a la detección del cambio de uso de suelo entre los años 1998 y 2006; cálculo de matrices de Markov; Evaluación Multi Criterio; Aplicación de AC y simulación espacial para los años 2014 y 2022; y estimación del coeficiente de escorrentía superficial para el período 1998-2022.

Impacto del cambio de uso de suelo en el coeficiente de escorrentía en Los Ángeles

El cambio de uso de suelo natural o rural a uso urbano produce importantes transformaciones, como por ejemplo el aumento de la escorrentía superficial, especialmente cuando se producen fuertes precipitaciones de tormenta lo que ocasiona desbordes, inundaciones, erosión, difusión de contaminantes, entre otros efectos (Goudie, 1990; Weng, 2001). En la ciudad de Los Ángeles, VIII Región del Biobío, al igual que en las principales ciudades de Chile Central, se está produciendo un rápido crecimiento horizontal de las superficies urbanas que al combinarse con la ocurrencia de fuertes precipitaciones invernales, concentradas en pocos días, originan importantes impactos ambientales, como las ocurridas este invierno recién pasado.

Los efectos de una precipitación extrema son de diversa índole, destacando inundaciones en los sectores topográficamente más deprimidos de la ciudad, destrucción de viviendas de condiciones estructurales precarias, colapso de red de alcantarillas y red de desagüe de aguas lluvia erosión de márgenes de los esteros y canales, entre otros. El aumento del escurrimiento es especialmente crítico ante los flujos provocados por tormentas invernales, en que la lluvia se concentra en pocas horas.

En diferentes estados del crecimiento urbano pueden ser observados varios impactos en el ciclo hidrológico (Kliber, 1982). En los primeros estados de la urbanización, la remoción de árboles y vegetación natural puede disminuir la evapotranspiración y la intercepción de las precipitaciones por parte de los follajes e incrementar la sedimentación en los cursos de agua, como consecuencia de la mayor erosión de los suelos. Más tarde, cuando comienza la construcción de casas, calles y canales, los impactos pueden incluir la disminución de la infiltración, rebaja en los acuíferos, incremento de flujos de tormenta y decrecimiento del flujo base durante períodos de sequía. Posteriormente, en una tercera etapa, cuando el desarrollo de construcciones residenciales y comerciales ya se ha completado, el incremento de la impermeabilidad reducirá el tiempo de concentración de la escorrentía, incrementando el peak de descarga inmediatamente después de comenzar la lluvia en la cuenca. Finalmente, cuando los alcantarillados y canales de desagüe se consolidan en la ciudad, se producen graves problemas de inundación aguas abajo.

Hough (1984) ha determinado que si se reduce la cobertura de árboles y vegetación en el área urbana decrece la evapotranspiración de 40% a 25%; aumenta la tasa de escorrentía de 10% a 30%; disminuye el tiempo de retraso entre la iniciación de precipitaciones y escorrentía; y, decrece la infiltración subterránea de 50% a 32%. Estos antecedentes permiten afirmar que uno de los más notables impactos ambientales del reemplazo de coberturas naturales por coberturas impermeables, corresponde al aumento de la escorrentía superficial.

El rol de las superficies de impermeabilización es crucial para el funcionamiento de las cuencas urbanas (Dow y DeWalle, 2000). De acuerdo a Goudie (1990), el monto del drenaje urbano vertido por el desagüe de alcantarillas y aguas lluvia, aguas abajo de la ciudad, puede ser mucho más grande que en las áreas rurales debido a la impermeabilización del suelo y aumento de la escorrentía en la ciudad.

Otro impacto importante del aumento de la escorrentía superficial es sobre la calidad del agua, especialmente durante fuertes tormentas que hacen colapsar los sistemas de alcantarillado y mezclan las aguas lluvia con aguas residuales con altas cargas de contaminantes, amenazando seriamente la calidad de los cuerpos de agua receptores (Rogers, 1994).

En Chile se han realizado pocos estudios para determinar los efectos de la urbanización sobre la escorrentía superficial, exceptuando algunas investigaciones en las ciudades de Temuco, Chillán y Quillota (Romero et al., 2003), y más recientemente en las subcuencas urbanizadas del piedemonte andino de Santiago (Romero y Vásquez, 2005). Estas investigaciones demuestran que las superficies urbanizadas, los diseños de urbanización y los estados de avance del proceso de urbanización, son factores que inciden grandemente en la impermeabilización de las cuencas y por ello en los efectos del crecimiento de la ciudad sobre el ciclo hidrológico.

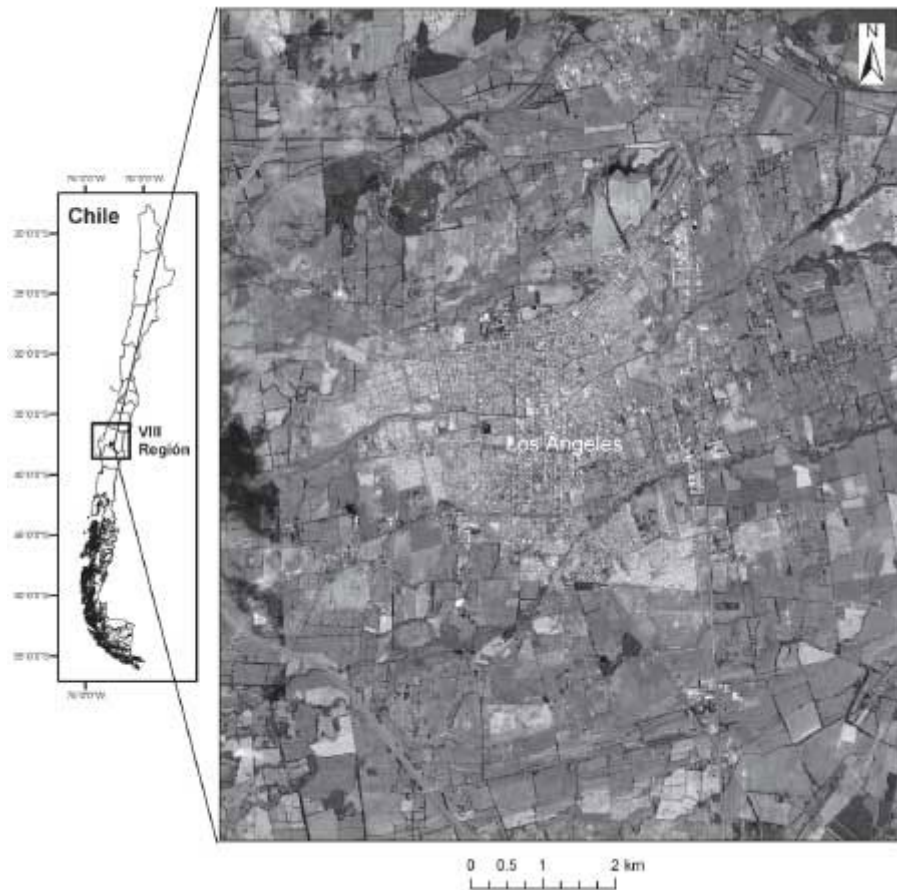
Por otro lado, el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) administrado por CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) exige a los proyectos o actividades que se someten bajo la forma de Estudio de Impacto Ambiental (EIA) a dicho sistema, la identificación y evaluación de los impactos ambientales, así como también la predicción de estos. Al respecto el artículo 12 del Reglamento de SEIA, letra g, señala que la predicción y evaluación de los impactos ambientales se efectuará en base a modelos, simulaciones, mediciones o cálculos matemáticos (MINSEGPRES, 2002).

En ese contexto, esta investigación se propone avanzar en la evaluación y pronosis de los coeficientes de escorrentía superficial en la ciudad de Los Ángeles, considerando la evolución del conjunto de usos de suelo y sus cambios futuros, dándole especial énfasis a la modelación del impacto ambiental.

Área de estudio y metodología

La ciudad de Los Ángeles se ubica 517 km al sur de la ciudad de Santiago y se localiza a 37° 28' S de latitud y 72° 21' W de longitud, a una altitud promedio de 133 metros sobre el nivel medio del mar, forma parte de la comuna homónima, y es la capital de la provincia del Biobío ([Figura N° 1](#)). Po-see una población de 123.445 personas (Censo 2002) y en el último período intercensal ha experimentado una tasa de crecimiento anual de 2,6%.

Figura N° 1
ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Sinia, 1998.

Los principales cursos hídricos que cruzan la ciudad de norte a sur son: los esteros El Bolsón, Saavedra, Maipo, Quilque y Paillihue, y el canal Rioseco. Antecedentes recopilados del proyecto de Actualización del Plan Regulador Comunal de Los Ángeles,

plantean que en el sector norponiente de la ciudad se encuentra un sector de humedales caracterizado por un mal drenaje y que en la temporada invernal dificultan el desarrollo de cualquier actividad productiva tradicional. En esta área, la presencia de humedales se debe a la cercanía de un depósito lahárico a la superficie, el cual es impermeable, dando origen a estos sectores muy húmedos. En contraste, en el sector oriente de la ciudad también hay presencia de numerosos humedales, pero se caracterizan por presentar suelos de excelente calidad aptos para todo tipo de cultivos (Ilustre Municipalidad de Los Ángeles y Centro de Ecología Aplicada, 2001).

Detección del cambio de uso de suelo

La base del modelo corresponde a la determinación de los usos / coberturas de suelo, para ello se ha interpretado las fotografías aéreas del año 1998 (obtenidas de [/www.sinia.cl](http://www.sinia.cl)), e imagen satelital Ikonos-2 PAN/MSI, del 15 de marzo de 2006, para un cuadrante de 12 por 12 km en Los Ángeles y sus alrededores. Las fotografías aéreas han sido escaneadas y georreferenciadas al sistema de coordenadas UTM WGS-84 (19S), utilizando como referencia la carta topográfica de Los Ángeles, escala 1: 50.000, del Instituto Geográfico Militar, así como también levantamientos aerofotogramétricos digitales formato CAD, escala 1: 5.000, año 1995 y visitas a terreno entre los años 2004-2006.

Empleando dichas imágenes georreferenciadas, se digitalizaron los polígonos de uso / cobertura de suelo, mediante el SIG ArcView 3.2, asignándoles un código de identificación a cada categoría en la base de datos respectiva. Las tipologías detectadas fueron: (1) urbano, (2) transporte, (3) cultivos, (4) matorrales, (5) bosques, (6) humedales, y (7) cuerpos de agua.

Modelo de simulación espacial

Sobre la base de los patrones de crecimiento urbano se propuso y desarrolló un Modelo de Simulación Simultánea de Cambio de Uso / Cobertura de Suelo (MSSCUS), orientado principalmente a determinar los usos de suelo futuro. Dicho modelo se realizó en el SIG Idrisi Kilimanjaro y comprendió tres fases generales. La primera consistió en determinar las probabilidades de transición de las distintas coberturas de suelo para simular la situación a un año x , sobre la base al período $x-1$, mediante el método de Cadena de Markov. A partir de este método se puede estimar la tendencia de cambio de un sistema a partir de los estados iniciales; si se conoce el modo en el cual cambian de un uso del suelo a otro en el tiempo, se puede llegar a conocer cómo podría estar estructurado el paisaje en el futuro (Martí et al., 2004).

Para ello se recurrió al módulo MARKOV del SIG Idrisi, se ingresó el mapa de uso de suelo del año 1998 y 2006 y se obtuvo matrices de probabilidades de transición, considerando un período de proyección de 8 y 16 años. Estas matrices expresan la probabilidad de un pixel de una categoría determinada a cambiar a otra clase o mantener la misma en el próximo período de tiempo (Eastman, 2003).

Luego se realizó una EMC, de acuerdo al método propuesto por Barredo (1996) y Eastman (2003), con el objetivo de determinar un mapa de aptitud de uso de suelo para cada categoría de uso de suelo. El método de EMC permite asignar usos posibles del suelo considerando una combinación de factores debidamente ponderados sobre la base de la importancia relativa que le otorgan los conocimientos acumulados y los expertos consultados. Los factores corresponden a criterios que determinan la mayor o menor aptitud que tiene cada pixel para un uso de suelo definido (0 nula aptitud a 255

máxima aptitud). Los factores considerados para el uso urbano fueron:

- a) Plano de proximidad a las rutas principales
- b) Plano de proximidad al centro urbano
- c) Plano de usos / coberturas más susceptibles de cambiar a uso urbano

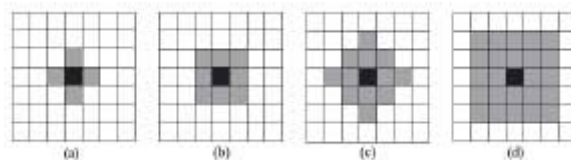
El método también considera limitantes o restricciones geográficas (máscaras) de carácter booleanas (valor 0 o 1), que limitan el análisis a un área geográfica particular. En el caso del uso urbano se utilizaron:

- a) Las áreas ya urbanizadas
- b) Cuerpos de agua

Finalmente, combinando el plano de referencia del año 2006, la matriz de transición de Markov, la EMC de cada uso de suelo y el método de Autómatas Celulares, se logró simular el uso / cobertura de suelo futuro para toda el área de estudio, para los años 2014 y 2022.

Es necesario recalcar que un AC es un agente u objeto que tiene la habilidad de cambiar su estado, basado en la aplicación de una regla que relaciona el nuevo estado con su estado previo y la situación de las celdas vecinas (Eastman, 2003). Es un sistema dinámico discreto que se desarrolla en el espacio y tiempo, compuesto por celdas, cuadrícula, vecinos y reglas. Las celdas son el elemento básico de los ACs, las cuales pueden tener estados binarios 1 o 0; la cuadrícula es la disposición de esas celdas en una red espacial en una o dos dimensiones; los vecinos son las celdas que determinan el estado de una celda ([ver Figura N° 2](#)); y las reglas, definen el estado de la celda para el próximo período. En el caso de las simulaciones realizadas se utilizó el vecino (o filtro) Von Neumann Extendido que viene por defecto en el módulo CA_MARKOV de Idrisi.

Figura N° 2
TIPOS DE VECINOS DE UN AUTÓMATA CELULAR



(a) Von Neumann, (b) Moore, (c) Von Neumann Extendido, (d) Moore Extendido

En general existen dos métodos para aplicar un AC basado en SIG: sin limitantes y con limitantes (Sui y Zeng, 2001). El primer modelo no considera restricciones geográficas, lo que significa que todas las celdas de la cuadrícula tienen igual posibilidad de cambiar de estado de acuerdo a su probabilidad, mientras que en el segundo las probabilidades de conversión de una celda no son permitidas en celdas que cumplen ciertos criterios. En este caso como se señaló anteriormente las restricciones consideradas en la EMC son los píxeles ya urbanizados y los cuerpos de agua.

Es importante destacar que el modelo utilizado se basa fundamentalmente en el modelo desarrollado en Henríquez et al. (2006), para el período 1978-1998 en las ciudades de Chillán y Los Ángeles, el cual ha sido validado mediante el índice Kappa,

entre el escenario simulado para el año 1998 y una imagen de referencia del mismo año.

Evaluación y proyección del coeficiente de escorrentía superficial

El coeficiente de escorrentía superficial (c) se define como el cociente entre el monto de precipitación de tormenta que escurre en superficie (Pe) y la precipitación de tormenta (P). Para determinar la escorrentía superficial se ha aplicado el modelo desarrollado por el Soil Conservation Service (USSCS) de Estados Unidos (Mockus, 1972; Chow et al., 1994), que se basa en la teoría sobre el destino de las precipitaciones en función de los resultados de estudios empíricos de varias cuencas pequeñas en Estados Unidos.

El modelo del USSCS considera los siguientes parámetros: (a) Grupo hidrológico del suelo (el cual depende del tipo de drenaje del suelo). Se han definido cuatro grupos de suelos a partir de sus distintas tasas de infiltración, que van de la más baja escorrentía potencial (Grupo A) a la más alta (Grupo D); para ello, se adaptaron a la clasificación del USSCS los tipos de suelos obtenidos de los fottomosaicos CIREN-CORFO, escala 1:20.000, de Los Ángeles, considerando las características de drenaje de ellos ([Cuadro N° 1](#)); (b) El porcentaje de impermeabilización de cada uso / cobertura de suelo, que también fueron adaptados a la clasificación del USSCS, y; (c) El monto de precipitación de tormenta extrema, valor que se ha extraído de las estadísticas meteorológicas de la ciudad Los Ángeles (DGAC, 1993), considerando el evento de mayor precipitación máxima en 24 horas.

Cuadro N° 1
ADAPTACIÓN DE LAS SERIES DE SUELOS DE IREN-CORFO AL
SISTEMA DE GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO DEL USSCS

| Tipo de drenaje de las series de suelo del IREN-CORFO | Grupo hidrológico del suelo del USSCS |
|---|---------------------------------------|
| 0 | Grupo A |
| 2 | Grupo A |
| 4 | Grupo B |
| 6 | Grupo C |
| 8 | Grupo D |
| Capacidad de uso VII y VIII sin especificación de drenaje | Grupo D |

Fuente: IREN-CORFO (1964).

Resultados y Discusión

Primera parte: Cambio del uso / cobertura de suelo 1998-2006

En los últimos ocho años la ciudad de Los Ángeles ha crecido un 22,3% ([Cuadro N° 2](#)),

no obstante el uso que porcentualmente más aumentó corresponde a la infraestructura de transporte que experimentó una variación de 79,5%. Este enorme cambio se debe fundamentalmente a la construcción del nuevo bypass de la ruta 5 al poniente de la ciudad, que ha tensionado el crecimiento urbano hacia ese sector. Los usos de suelo que más han disminuido han sido el matorral y cultivos y pastizales, y humedales, en ese orden, mientras que el uso forestal aumentó levemente su superficie (5 hectáreas), lo cual tiene una importante repercusión en el comportamiento del coeficiente de escorrentía como se verá más adelante.

Cuadro Nº 2
EVOLUCIÓN DE LOS USOS / COBERTURAS DE SUELO EN LOS ÁNGELES 1998-2006

| Usos/coberturas de suelo | 1998 | | 2006 | |
|--------------------------|--------|-------|--------|-------|
| | Ha | % | Ha | % |
| Urbano | 1.853 | 12,86 | 2.267 | 15,74 |
| Transporte | 137 | 0,95 | 246 | 1,71 |
| Cultivos | 11.053 | 76,72 | 10.605 | 73,61 |
| Matorral | 272 | 1,89 | 208 | 1,44 |
| Bosque | 497 | 3,45 | 502 | 3,48 |
| Humedal | 464 | 3,22 | 447 | 3,10 |
| Cuerpos de agua | 131 | 0,91 | 132 | 0,92 |

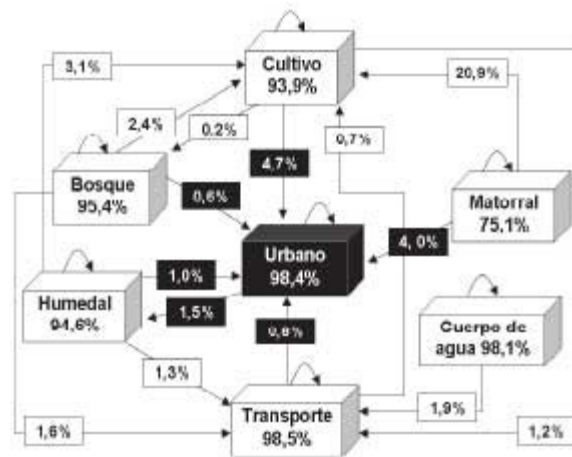
Fuente: Elaboración propia.

Segunda parte: Cadenas de Markov

A partir de los resultados anteriores se calcularon las probabilidades de transición de cambio de uso de suelo utilizando como años de referencia 1998 y 2006. Se realizaron dos matrices para representar los intervalos temporales 2006-2014 y 2006-2022, que son la base para las simulaciones de distribuciones futuras de uso de suelo. Se observa que la mayor probabilidad de cambio de las distintas categorías de uso de suelo es al uso urbano, especialmente respecto a las coberturas de cultivos (4,7 %), matorrales (4,0 %), humedales (1,0 %), transporte (0,8 %) y bosque (0,6 %), respectivamente, como se aprecia en la [Figura Nº 3](#).

Figura Nº 3
PROBABILIDADES DE TRANSICIÓN (CADENAS DE MARKOV)

PARA LOS USOS DE SUELO EN LOS ÁNGELES



Tercera parte: Evaluación Multicriterio

En esta fase se realizó una EMC a cada clase de uso/cobertura de suelo para el año 2006, considerando factores y limitantes, con la ayuda del módulo Decision Support Wizard en Idrisi. La EMC para el uso urbano fue desarrollada con mayor profundidad, dado que es el uso más dinámico en el paisaje. Para ello se han considerado los factores y restricciones señalados en la metodología, debidamente estandarizados. En el caso de los factores distancia al centro y distancia a vías principales se estandarizaron considerando los puntos de inflexión de la curva de decaimiento por distancia establecidos en Henríquez et al. (2006).

Por otro lado, la ponderación de la importancia entre los tres factores se elaboró mediante el Proceso de Jerarquía Analítica (Analytical Hierarchy Process, AHP). Este método requiere la valoración comparativa de importancia entre pares, es decir, indicar cuál es la importancia de un factor respecto a otro utilizando una escala de nueve posibilidades, que abarca de la mayor importancia (9), igual importancia (0) a la menor importancia (1/9). La asignación de pesos entre factores ([Cuadro N° 3](#)) se fundamentó en el comportamiento de los patrones de crecimiento urbano y probabilidad de cambio de uso de suelo analizados en el punto anterior. De esta forma, se obtuvieron los siguientes valores de jerarquía, en orden de importancia: distancia a vías principales (0,6491), distancia al centro (0,2790) y susceptibilidad de cambio de otros usos (0,0719). Como ejemplo se presenta la aptitud de uso urbano ([Figura N° 4](#)).

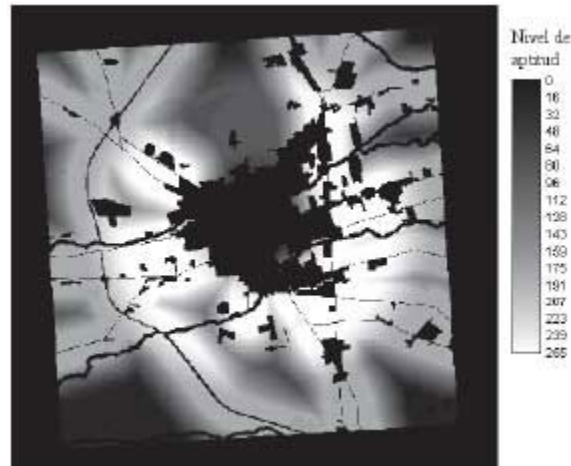
Cuadro N° 3

ASIGNACIÓN DE PESOS ENTRE FACTORES

| Factores | Distancia a rutas principales | Distancia al centro urbano | Probabilidad de cambio de uso urbano |
|--------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Distancia a rutas principales | 0 | 3 | 7 |
| Distancia al centro urbano | - | 0 | 5 |
| Probabilidad de cambio de uso urbano | - | - | 0 |

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 4
EVALUACIÓN MULTICRITERIO DEL USO URBANO EN LOS ÁNGELES



Fuente: Elaboración propia.

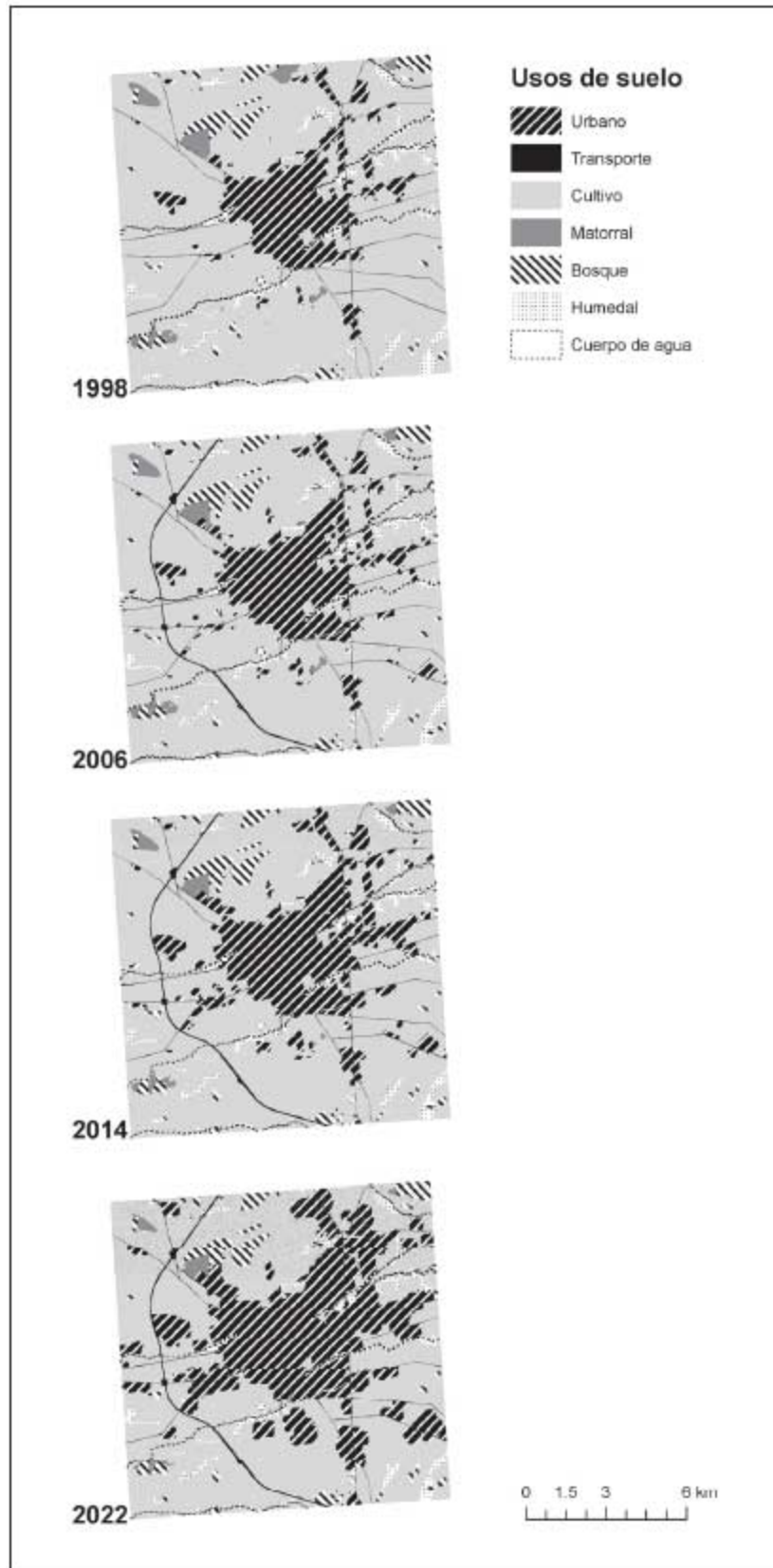
Para el caso de los mapas de aptitud de las categorías cultivo, matorral y bosque se consideraron igualmente como limitantes a las áreas ya urbanizadas (uso urbano y transporte) y como factor el resto de los usos; por lo tanto, al considerar solo un factor no fue necesario emplear el AHP. El criterio para valorar los usos consistió en otorgar mayor relevancia al propio uso (otorgándole el mayor valor de aptitud, 255) y menor valor al resto de los usos de acuerdo a la susceptibilidad de cambio de uso observado (valores menores a 250), de acuerdo a la probabilidad condicional obtenidas de las Cadenas de Markov. Para el resto de las coberturas se realizó una EMC simple considerando como limitante todos los otros usos, ya que no presentan una dinámica de cambio de uso de suelo importante; y como factor se consideró el propio uso, asignándole la mayor ponderación (255). Finalmente, se unieron todas las EMC en un solo archivo de compilación.

Cuarta parte: Aplicación de Autómatas Celulares

Sobre la base de todos los resultados anteriores, más el método de Autómatas Celulares se desarrolló el MSSCUS, orientado a estimar el uso futuro para toda el área de estudio. Los escenarios de simulación para el año 2014 y 2022, así como los años de referencia 1998 y 2006 se aprecian en la [Figura N° 5](#). Mientras que la magnitud de dichos cambios se exhibe en el [Cuadro N° 4](#).

Figura N° 5
EVOLUCIÓN Y PROYECCIÓN DE LOS USOS/COBERTURAS DE SUELO 1998-2022 EN

LOS ÁNGELES



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro Nº 4
SIMULACIÓN DE LOS USOS/COBERTURAS DE SUELO EN LOS ÁNGELES 2014-2022

| Usos/coberturas de suelo | 2014 | | 2022 | |
|--------------------------|--------|-------|-------|-------|
| | Ha | % | Ha | % |
| Urbano | 2.775 | 19,26 | 4.113 | 28,55 |
| Transporte | 288 | 2,00 | 438 | 3,04 |
| Cultivos | 10.117 | 70,22 | 8.623 | 59,85 |
| Matorral | 157 | 1,09 | 106 | 0,74 |
| Bosque | 507 | 3,52 | 498 | 3,46 |
| Humedal | 431 | 2,99 | 501 | 3,48 |
| Cuerpos de agua | 132 | 0,92 | 129 | 0,90 |

Fuente: Elaboración propia.

Una de las ventajas que entrega el MSSCUS es el carácter estocástico para ilustrar el proceso de urbanización; es decir, la aparición espontánea de parches urbanos en el hinterland adyacente. Otra ventaja, como se ha indicado, es que permite simular la totalidad de los usos de suelo de manera simultánea.

En el sector norte de las proyecciones se observa un efecto de "sal y pimienta" correspondiente a una distribución aleatoria de píxeles propio del proceso empleado. Esta perturbación corresponde a una deficiencia técnica del método empleado que depende del rango temporal considerado en la simulación (Pontius y Malanson, 2005).

Las simulaciones realizadas reafirman las tendencias observadas en el período precedente; en el caso particular del uso urbano se estima un aumento de 508 ha para el año 2014 y de 1.846 ha para el 2022 correspondiente a una variación de 81,4% entre 2006-2022, que se concentraría, principalmente, en el sector oriente de la ciudad, bajo la forma de parcelas de agrado, condominios privados, industrias y servicios.

Quinta parte: Evaluación y simulación del cambio en el coeficiente de escorrentía superficial

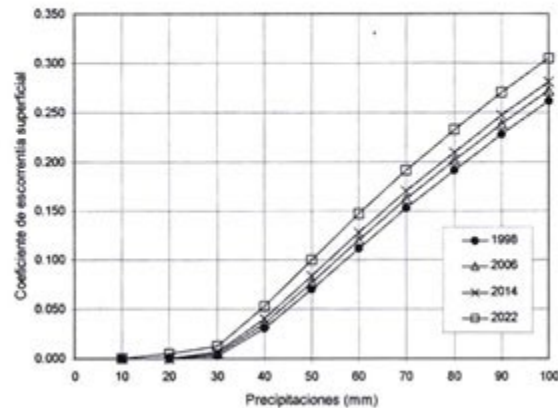
Finalmente en la última etapa, se ha evaluado y proyectado teóricamente el cambio en el coeficiente de escorrentía superficial, utilizando como dato base los usos / coberturas de suelo del MSSCUS.

Considerando una precipitación de tormenta máxima en 24 horas promedio de 117,2 mm, es posible estimar una escorrentía de 36,7 mm, 38,0 mm, 39,1 mm y 41,9 mm para los años 1998, 2006, 2014 y 2022, respectivamente. Es decir se proyecta un cambio de solo 10,1% entre los años 2006 y 2022 ($c = 0,3134$ y $c = 0,3578$, respectivamente), porcentaje muy inferior a la variación del crecimiento de la superficie urbana en igual período. Esto se debe en gran parte a la alta capacidad de

almacenamiento hídrico de los grupos hidrológicos de suelo sobre los cuales ha cambiado el uso de suelo. En segundo lugar, se está considerando un sistema integrado de usos de suelo que influyen en el valor del CN (Número de Curva) y por lo tanto sobre el monto de escorrentía final estimado teóricamente. Es decir, mientras algunos usos altamente impermeables, como el área urbana y las vías de transporte, aumentarían considerablemente su superficie en el período 2006-2022, otros usos con alta capacidad de almacenamiento de agua, ubicados en las inmediaciones de la ciudad, principalmente los bosques, también incrementarían o mantendrían su superficie, con lo cual el valor final del coeficiente se equilibra.

Para evaluar el comportamiento del coeficiente de escorrentía superficial en función de la precipitación, se han construido curvas que relacionan ambas variables para los años 1998, 2006, 2014 y 2022 (Figura N° 6). En ellas se puede observar que bajo los 20 mm de precipitación no se produce escorrentía superficial, excepto para la proyección del año 2022. Sobre los 20 mm de precipitación, la tendencia de las curvas es creciente a medida que la precipitación incrementa su monto, hasta llegar a los 100 mm de agua caída. La proyección para el 2022 presenta mayores montos debido a una mayor extensión de la superficie urbana simulada.

Figura N° 6
EVOLUCIÓN Y PROYECCIÓN DE LA RELACIÓN
ENTRE EL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA Y
PRECIPITACIONES DE 10 A 100 MM EN LOS
ÁNGELES



Fuente: Elaboración propia.

El impacto ambiental de este indicador podría ser mayor a las proyecciones planteadas, considerando que dichos valores dependen estrechamente de un eventual despliegue de usos de suelo permeables, como plantaciones forestales en el cuadrante de estudio. Este último supuesto es incierto, ya que a futuro las coberturas forestales podrían ser reemplazadas por superficies urbanas u otros proyectos viales. Este es el caso de Los Ángeles donde, entre 1998-2006, el hinterland de la ciudad ha seguido urbanizándose, especialmente por la concreción del segundo by pass de la ruta panamericana al poniente de la ciudad.

Conclusiones

A través de la aplicación del modelo de simulación espacial se ha logrado evaluar y simular el cambio en los valores del coeficiente de escorrentía superficial de la ciudad de Los Ángeles y sus alrededores, lo que constituye una interesante perspectiva de investigación y una aproximación metodológica que considera el uso de nuevas herramientas de análisis espacial para la evaluación ambiental de los procesos de desarrollo urbano.

Respecto al comportamiento del indicador analizado, es decir el escurrimiento superficial, es importante destacar que, con una adecuada planificación del territorio a nivel de cuencas urbanas y rur-urbanas, es posible mantener e incluso aminorar los efectos derivados de la impermeabilización de suelos y el aumento de la escorrentía superficial, a través de una ordenación armónica del territorio, por ejemplo, respetando ciertas densidades de ocupación del suelo en áreas de borde con capacidad de retención de humedad o bien manteniendo los parches de vegetación natural en zonas húmedas o cursos de agua. De este modo, y desde una perspectiva ambiental, será posible un proceso de crecimiento urbano más sustentable, en la medida que los nuevos usos del suelo y densidades de ocupación, permitan o favorezcan una mayor capacidad de infiltración del agua lluvia y, por otro lado, morigeren el escurrimiento superficial y sus efectos sobre la ciudad. Lo anterior, cobra vital importancia en ciudades como Los Ángeles, cuyos sitios urbanos se han emplazado sobre áreas agrícolas, zonas húmedas y sistemas de drenaje naturales constituidos por esteros, canales y humedales.

Se puede concluir que las repercusiones ambientales de este acelerado crecimiento urbano en la ciudad de Los Ángeles y, por sobre todo, la forma en que se está llevando a cabo, representado por un crecimiento a mayores distancias del centro histórico; ocupación de suelos, para fines urbanos, con alto valor ecológico y ambiental para la ciudad; eliminación de cobertura vegetal; alta densidad de ocupación del suelo e impermeabilización de zonas de drenaje (si bien es cierto que los usos residenciales periféricos en su mayoría corresponden a parcelas de agrado o condominios privados de muy baja densidad de ocupación), como también la obturación de esteros y canales de riego, está provocando importantes impactos ambientales como el aumento de escorrentía superficial y riesgo por inundación en la ciudad.

La magnitud e irreversibilidad del proceso urbanización afecta no solo el aumento de la escorrentía superficial sino también otros aspectos ambientales que se pueden evaluar con el MSSCUS, como pérdida de suelo agrícola, fragmentación del paisaje, cambio en las temperaturas superficiales, entre otros. Esto abre nuevas perspectivas para futuras investigaciones, así como también la consideración de la cuenca hidrográfica urbana en el estudio la escorrentía y áreas de inundación.

Los eventos de precipitación extrema en corto tiempo que producen violentos desbordes de ríos y quebradas que destruyen viviendas, infraestructura e incluso vidas humanas, son un claro ejemplo del desconocimiento del funcionamiento natural de las cuencas urbanas. Una adecuada planificación de usos de suelo y evaluación ambiental estratégica en esta ciudad inter-media constituyen una enorme oportunidad para mitigar y reducir los impactos ambientales asociados al aumento de la escorrentía producto del acelerado cambio de uso de suelo urbano y sus proyecciones futuras.

Notas

¹ Esta investigación es parte de los resultados del Proyecto Fondecyt N° 1050649 Modelación del cambio de uso del suelo en la interfase urbano-rural; Artículo recibido el 12 de septiembre de 2006 y aceptado el 2 de noviembre de 2006.

Referencias bibliográficas

AGUAYO, M.; AZÓCAR, G.; WIEGAND, T.; WIEGAND, K. & VEGA, C. Revealing driving forces of mid-cities urban growth patterns using spatial modeling: a case study of Los Angeles (Chile). *Ecology and Society*, 2006, (en prensa).

[[Links](#)] BARREDO, J. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio. Madrid: RA-MA Editorial, 1996.

[[Links](#)] BROWN, D.; GOOVAERTS, P.; BURNICKI, A. & LI, M. Stochastic simulation of land-cover change using geostatistics and generalized additive models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2002, N° 68, Vol.10, p. 1051-1061.

[[Links](#)] CHOW, V.; MAIDMENT, D. y MAYS, L. Hidrología Aplicada. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A., 1994.

[[Links](#)] DEKONING, G.; VERBURG, P.; VELDKAMP, A. & FRESCO, O. Multi-scale modeling of land use change dynamics in Ecuador. *Agricultural Systems*, 1999, N° 61, p. 77-93.

[[Links](#)] DE LA CUADRA, M. y FERNÁNDEZ, B. Modelación Espacio-Temporal de sequías regionales mediante Autómatas Celulares. En: XV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Concepción: Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, 2001.

[[Links](#)] DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL (DGAC). Dirección Meteorológica de Chile. Anuario Meteorológico 1992 y 1993. Santiago: Fuerza Aérea de Chile, 1994.

[[Links](#)] DOW, C. & DEWALLE, D. Trends in evaporation and Bowen ratio on urbanizing watersheds in eastern United States. *Water Resources Research*, 2000, N° 36, Vol.7, p. 1835-1844.

[[Links](#)] EASTMAN, J. IDRISI Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing. Worcester, MA: Clark Labs, Clark University, 2003.

[[Links](#)] GOUDIE, A. The human impact on the natural environment. Oxford: Basil Blackwell, 1990.

[[Links](#)] HENRÍQUEZ, C.; AZÓCAR, G. & ROMERO, H. Monitoring and modeling urban growth in a developing country: the case of mid-cities of Chillan and Los Angeles, Chile. *Habitat International*, 2006, N° 30, Vol. 4, p. 945-964.

[[Links](#)] HOUGH, M. City Form and Natural Processes. London: Croom Helm Publishers, 1984.

[[Links](#)] ILUSTRE MUNICIPALIDAD DE LOS ÁNGELES y CENTRO DE ECOLOGÍA APLICADA. Memoria Explicativa Actualización del Plan Regulador Comunal de Los Ángeles. Los Ángeles, Centro de Ecología Aplicada Ltda., 2001.

[[Links](#)] IREN-CORFO. Suelos. Descripciones Proyecto Aerofotogramétrico Chile / O.E.A. / B.I.D. Santiago: Instituto de Información de Recursos Naturales CORFO, 1964.

[[Links](#)] KLIBER, D. Urban stormwater hydrology. Washington, DC: American Geophysical Union, 1982.

[[Links](#)] MARTÍ, C.; PEÑA, J. y PINTÓ, J. Metodología de análisis de la transformación del paisaje de la Costa Brava: Evolución, diagnóstico y pronóstico. En: CONESA, C. y MARTÍNEZ, J. Territorio y Medio Ambiente: Métodos cuantitativos y técnicas de información geográfica. Murcia: Grupo de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección de la Asociación de Geógrafos Españoles y Departamento de Geografía, Universidad de Murcia, 2004, p. 317-328.

[[Links](#)] MINSEGPRES. Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Santiago: Diario Oficial. Ministerio Secretaría General de la República. Decreto Supremo N° 95/01, 2002, p. 47.

MOCKUS, V. Chapter 10. Estimation of direct runoff from storm rainfall. In: U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, S. C. S. SCS National Engineering Handbook, Section 4: Hidrology. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1972.

[[Links](#)] PIJANOWSKI, B.; PITHADIA, S.; SHELLITO, B. & ALEXANDRIDIS, K. Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States. International Journal of Geographical Information Science, 2005, N° 19, Vol. 2, p. 197-215.

[[Links](#)] PONTIUS, R. y MALANSON, J. Comparison of the structure and accuracy of two land change models. International Journal of Geographical Information Science, 2005, N° 19, Vol. 2, p. 243-265.

[[Links](#)] QI, Y. & WU, J. Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using autocorrelation indices. Landscape Ecology, 1996, N° 11, Vol. 1, p. 39-49.

[[Links](#)] RAMÍREZ, J. Clasificación y predicción de cambios de cobertura del suelo en la Comuna de Ninhue (secano interior), provincia de Ñuble, VIII Región. Revista de Geografía Norte Grande, 2003, N° 29, p. 95-105.

[[Links](#)] ROGERS, P. Hydrology and water quality. En: MEYER, W. & II, B. Change in land use and land cover: A global perspective. New York: Cambridge University Press, 1994, p. 231-257.

[[Links](#)] ROMERO, H.; ÓRDENES, F. y VÁSQUEZ, A. Ordenamiento territorial y desarrollo sustentable a escala regional, ciudad de Santiago y ciudades intermedias en Chile. En: FIGUEROA, E. y SIMONETTI, J. Globalización y Biodiversidad: Oportunidades y desafíos para la sociedad chilena. Santiago: Programa Interdisciplinario de Estudios en Biodiversidad (PIEB). Santiago: Universidad de Chile, 2003, p. 167-224.

[[Links](#)] ROMERO, H. y VÁSQUEZ, A. Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. EURE, 2005, N° 94, Vol. 31, p. 97-117.

[[Links](#)] SUI, D. Z. y ZENG, H. Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case study in Shenzhen. Landscape and Urban Planning, 2001, N° 53, Vol.1-4, p. 37-52.

[[Links](#)] THEOBALD, D. y HOBBS, N. Forecasting rural land-use change: a comparison of regression and spatial transition-based models. Geographical and Environmental Modelling, 1998, N° 2, Vol.1, p. 62-82.

[[Links](#)] WENG, Q. Modeling Urban Growth Effects on Surface Runoff with the Integration of Remote Sensing and GIS. Environmental Management, 2001, N° 28, Vol. 6, p. 737-748.

[[Links](#)] WENG, Q. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS, and stochastic modeling. Journal of Environmental Management, 2002, N° 64, p. 273-284.

[[Links](#)] ZHOU, G. & LIEBHOLD, A. Forecasting the Spatial Dynamics of Gypsy-Moth Outbreaks Using Cellular Transition Models. Landscape Ecology, 1995, N° 10, Vol.3, p. 177-189. [[Links](#)]