

## CRECIMIENTO URBANO Y CAMBIOS DE USOS DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO LUJÁN HACIA 2030. LINEAMIENTOS METODOLÓGICOS DE LA MODELIZACIÓN ESPACIAL PROSPECTIVA

Luis Humacata

Instituto de Investigaciones Geográficas  
Universidad Nacional de Luján

### Resumen

El presente trabajo desarrolla los lineamientos metodológicos de la modelización espacial prospectiva del crecimiento urbano y cambios de usos del suelo en la cuenca del río Luján. A partir de la metodología de análisis espacial cuantitativo se sistematizan los procedimientos de la técnica de autómatas celulares, cadenas de Markov y Evaluación multicriterio. El desarrollo metodológico pretende obtener como resultado el modelo espacial prospectivo que predice la configuración urbana y de usos del suelo hacia el año 2030, como aporte para la formulación de estrategias vinculadas al Ordenamiento territorial, con el objetivo de lograr un desarrollo territorial sostenible a escala urbano-regional.

**Palabras clave:** Geografía Cuantitativa, Modelización espacial, Sistemas de Información Geográfica, Cuenca del río Luján.

### Abstract

This work develops the methodological guidelines for the prospective spatial modeling of urban growth and land use changes in the Luján River basin. Using quantitative spatial analysis methodology, the procedures of the cellular automata technique, Markov chains, and multicriteria evaluation are systematized. The methodological development aims to produce a prospective spatial model that predicts the urban and land use configuration towards the year 2030, as a contribution to the formulation of strategies related to land-use planning, with the goal of achieving sustainable territorial development at the urban-regional scale.

**Keywords:** Quantitative Geography, Spatial modeling, Geographic Information Systems, Luján River Basin.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el crecimiento acelerado de la urbanización está produciendo conflictos por la competencia espacial entre usos del suelo en espacios que forman parte de la franja urbano-rural (Carter, 1983), generando un impacto negativo en las coberturas naturales y usos del suelo sobre los cuales se expande (Matteucci *et al.*, 2006). Frente a este panorama, se han desarrollado aportes que abordan los efectos de la urbanización en la sostenibilidad territorial (Hernández Ruíz, 2014), bajo el modelo de ciudad fragmentada (Borsdorf, 2003), cuya característica es la forma de crecimiento insular (Janoshcka, 2002), y la agudización de las disparidades socioespaciales (Buzai y Marcos, 2014).

Desde la Geografía, en su vertiente cuantitativa y aplicada, se busca la generación de modelos espaciales a partir de la metodología de análisis espacial cuantitativo apoyado en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). En este marco, se llega a la modelización espacial con la finalidad de explicar y predecir patrones espaciales (Buzai y Baxendale, 2013).

El análisis y la modelización espacial de los cambios de usos del suelo genera resultados de suma utilidad para la toma de decisiones en materia de planificación territorial. En este sentido, resulta necesario comprender los cambios desde una perspectiva histórica, es decir, evaluar cómo ha sido la dinámica de la ocupación del suelo en periodos anteriores, detectando las categorías que han presentado los mayores incrementos y de cómo ha sido su impacto en el ritmo de cambio de otros usos del suelo. Desde el GECLU (Grupo de Estudios de Geografía Aplicada de la cuenca del río Luján), perteneciente al PRODISIG-UNLu, se vienen desarrollando una serie de proyectos vinculados a realizar un diagnóstico de la dinámica de ocupación del suelo en el área de estudio, antecedentes que se han originado en el proyecto “Análisis espacial del crecimiento urbano y conflictos ante cambios de usos del suelo en la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina) en el periodo 1990-2010 y su modelización hacia 2030. Diagnóstico y propuestas con Sistemas de Información Geográfica”<sup>1</sup>.

En cuanto a la modelización espacial prospectiva, dirigida a determinar el crecimiento urbano y los cambios de usos del suelo futuro, podemos señalar que consiste en obtener una proyección del comportamiento espacial futuro de todas las categorías, incluyendo factores antrópicos y ambientales, que son los que van a direccionar el cambio futuro. Es por ello, que los modelos prospectivos intentan modelar una realidad sumamente compleja, donde se dan procesos de cambios a partir de diversas causas, como los aspectos económicos, poblacionales, del entorno natural, y normativos, entre otros, que de alguna manera influyen en la dinámica regional de ocupación del suelo. En este sentido, surgen propuestas basadas en modelos matemáticos y estadísticos, u otros como los autómatas celulares, redes neuronales, cadenas de markov, modelado basado en agentes, entre otros, que pueden aplicarse individualmente o a partir de una combinación, lo cual resulta, en este caso, en un enfoque basado en modelos híbridos. A partir de estas consideraciones, el presente trabajo se enfocará en desarrollar los lineamientos metodológicos del modelo de predicción del crecimiento urbano y cambios de usos del suelo para la región de la cuenca del río Luján.

## EL ÁREA DE ESTUDIO

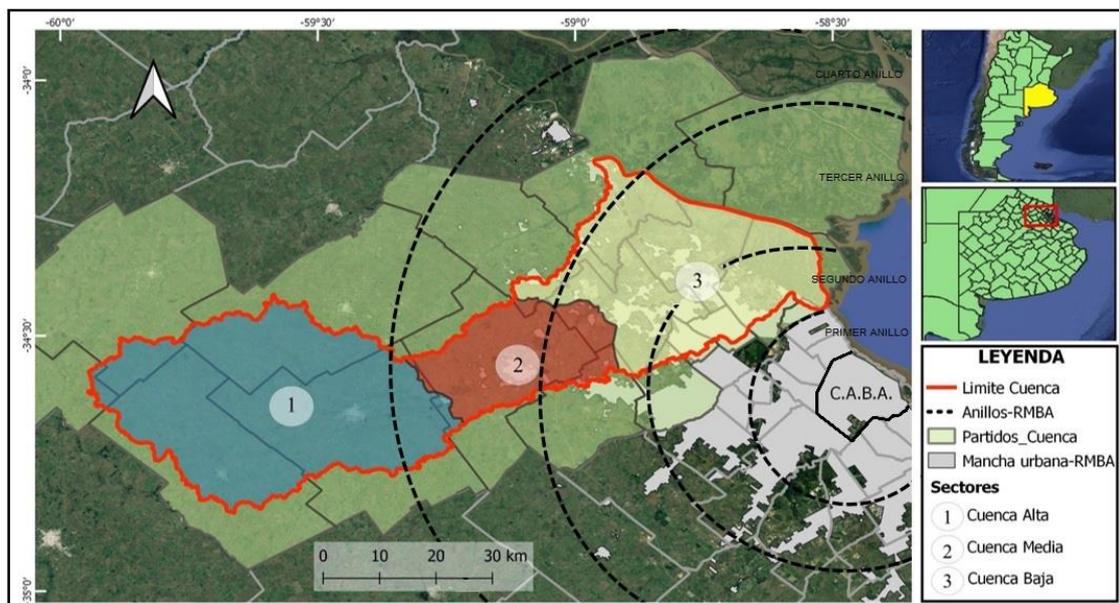
El área de estudio corresponde a la cuenca hidrográfica del río Luján, ubicada al noreste de la provincia de Buenos Aires. El río Luján es el curso principal y el que le da nombre a la cuenca hidrográfica, con un recorrido de 157 km desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río de la Plata. La cuenca tiene una superficie de 3.762 km<sup>2</sup>, y se posiciona como la de mayor superficie en la Región Metropolitana de Buenos Aires, ocupando el 14 % del total de la región.

---

<sup>1</sup> Proyecto radicado en el Departamento de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Luján. Periodo: 2018-2022. Director: Mg. Luis Humacata.

El área de estudio se divide en tres sectores: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja, abarcando de forma parcial dieciséis municipios, y cuenta con una población total de 1.925.072 (INDEC, 2013). Presenta una gran diversidad de coberturas y usos del suelo, bajo un esquema de organización espacial que configura un gradiente urbano-rural, en dirección este-oeste, desde los municipios que forman parte del segundo anillo de la Región Metropolitana de Buenos Aires e integran la mancha urbana del Gran Buenos Aires, con altos niveles de densidad poblacional y ocupación del suelo, disminuyendo a medida que aumenta la distancia a la ciudad de Buenos Aires, como centro urbano de mayor densidad, extendiéndose hacia los municipios que forman parte de la franja urbano-rural, en el tercer y cuarto anillo, que presentan una mayor heterogeneidad de usos del suelo, hasta el sector de la cuenca alta, sujeto a la dinámica rural, donde la actividad agropecuaria ocupa la mayor superficie.

**Figura 1.** Cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina).



Fuente: Elaboración propia.

## METODOLOGÍA DE MODELIZACIÓN ESPACIAL PROSPECTIVA

La propuesta metodológica de modelización espacial prospectiva se ha organizado en las siguientes cuatro fases:

### 1. Cadenas de Markov

El modelo de cadenas de Markov se basa en considerar que el estado futuro de un sistema puede llegar a simularse teniendo en cuenta el estado inmediatamente anterior. Es decir, la distribución espacial de usos del suelo en el tiempo  $t$  es el resultado de la situación en un momento anterior, definido por  $t-1$ . Es así como dicho modelo se basa en que la probabilidad de que ocurra un evento se encuentra íntimamente relacionada a las características de dicho evento, pero en un estado anterior (Buzai y Baxendale, 2011).

El modelo parte de esta consideración para describir el cambio de uso del suelo de un periodo a otro y posteriormente lo aplica para la proyección de cambios futuros. Se procede metodológicamente a partir de la superposición y comparación de dos capas temáticas de usos del suelo de dos cortes temporales, a partir de dicho procedimiento se estima una matriz de probabilidad de transición para cada localización hacia cada categoría, y una matriz de probabilidades de cambio.

Los pasos metodológicos para la aplicación del modelo de cadenas de Markov son los siguientes:

El proceso de conversión de un estado en otro estado de un sistema se denomina transición de estado. Si se considera que P es la probabilidad de transición de un estado actual en otro estado en el siguiente corte temporal, la fórmula es la siguiente:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & P_{mm} \end{bmatrix}$$

donde P representa la probabilidad del estado i al estado j.

Dicha ecuación debe cumplir con las siguientes condiciones:

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1,$$

$$0 \leq P_{ij} \leq 1.$$

En este sentido, resulta necesario la obtención de la matriz de probabilidades de transición y de probabilidades de cambio, a partir de las cuales el modelo predictivo de Markov quedaría definido de la siguiente manera:

$$P(n) = P(n-1) \quad P_{ij} = P(0)P_{ij}^n,$$

donde  $P_n$  representa la probabilidad de estado de cualquier momento y  $P(0)$  representa la matriz primaria.

Los resultados de la predicción resultan en una colección de mapas de categorías de usos del suelo, cuyos píxeles contienen la probabilidad de pertenecer a determinada categoría (Paegelow *et al.*, 2003). Como hemos señalado, se generan dos matrices, una con la probabilidad de transición entre todas las categorías, y otra de áreas de transición, que indica la cantidad de píxeles que son candidatos a transitar hacia otra categoría.

Resulta necesario puntualizar que el modelo de Markov se basa exclusivamente en el análisis de los cambios internos de las categorías de ocupación del suelo, por lo que no considera la incorporación de otro tipo de variables, con alto componente explicativo y descriptivo. Por tal motivo, la propuesta metodológica de la presente investigación, se apoya en los antecedentes en la temática, que indican la incorporación complementaria de las técnicas de evaluación multicriterio, para la definición de los potenciales de transición, a partir de mapas de aptitud al cambio de uso del suelo de cada categoría.

## 2. Análisis de Evaluación Multicriterio

Las técnicas de evaluación multicriterio han tenido un gran desarrollo dentro de lo que se denomina modelado cartográfico basado en el uso de los SIG. En este sentido, cabe mencionar algunas obras clásicas que han sistematizado esta metodología de vital importancia para la ciencia

geográfica, tales como Tomlin (1990), Eastman *et al.* (1993), Gómez Delgado y Barredo Cano (2006), y Buzai y Baxendale (2011).

La finalidad de esta metodología radica en la búsqueda de resultados de sitios de aptitud locacional para el desarrollo de determinados usos del suelo, lo cual da cuenta de su capacidad como herramienta para la generación de propuestas socioespaciales en apoyo a la toma de decisiones en el marco de la planificación territorial.

A continuación, se presentan los principales procedimientos técnicos para la aplicación del método de combinación lineal ponderada, cuyo objetivo es generar mapas de aptitud espacial de cada categoría al cambio de usos del suelo.

a) Selección de criterios:

Se determinan los criterios a considerar, ya sean factores (con valores de aptitud continua) o restricciones (capas de limitantes de aptitud). En este punto se procede a la creación de las capas temáticas que serán consideradas para la obtención del mapa de aptitud de cada uno de los usos del suelo.

b) Estandarización de factores:

La estandarización de variables se puede realizar desde dos perspectivas. La estandarización a partir de la lógica booleana, considera trabajar solamente con mapas de restricciones, los cuales cuentan con dos categorías: 0=áreas sin aptitud y 1=áreas con aptitud. La otra perspectiva implica realizar una estandarización continua en las categorías de los factores. En este sentido, la lógica fuzzy permite la obtención de mapas de aptitud continua para cada factor, es decir, que la diferencia estaría dada porque las zonas de aptitud no tienen la misma aptitud en todas las localizaciones intervinientes, sino que ellas variarán de manera continua en su interior (Buzai y Baxendale, 2011).

c) Ponderación de factores:

La importancia relativa de cada factor en la definición del mapa de aptitud para cada uso del suelo, se realiza a partir del método de ponderación por ranking recíproco. Este método se basa en la consideración de expertos en cada temática para el establecimiento de los parámetros de importancia. Se aplica a partir de la siguiente fórmula:

$$w_j = \frac{1/r_j}{\sum(1/r_j)}$$

donde  $w_j$  es el valor de ponderación otorgado a cada factor y  $r_j$  el número de orden en el ranking de acuerdo a los valores de importancia. Las propiedades de este método indican que los valores van de 0 a 1, y cuya sumatoria es de 1.

d) Combinación lineal ponderada:

Consiste en la correspondencia espacial entre los factores con la inclusión de los valores de ponderación. El resultado es un valor resumen para cada mapa de aptitud, es decir, que cada localización asume un valor de aptitud ( $I$ ). Estos procedimientos se realizan según la siguiente fórmula:

$$I_i = (f_1 \times p_1) + (f_2 \times p_2) + (f_3 \times p_3) + \dots + (f_n \times p_n)$$

$$I_i = \sum f_i p_i$$

donde  $I_i$  es el valor índice para cada unidad espacial  $i$ ,  $\sum$  es la sumatoria de los resultados totales de las capas temáticas,  $p$  son los valores de ponderación de cada factor.

En este momento es posible la integración de capas de limitantes a partir de procedimientos matemáticos de multiplicación de capas booleanas. En este sentido, la ampliación de la fórmula sería la siguiente:

$$I_i = \sum_{i=1}^n f_i p_i \prod r_j$$

### 3. Autómatas celulares

La técnica de modelado espacial basado en autómatas celulares ha sido una de las más utilizadas cuando se pretende predecir los patrones espaciales de expansión urbana y cambios de usos del suelo. Se encuentra dentro del grupo de los modelos heurísticos, es decir, que pretende generar simulaciones de procesos no lineales, enfocado en los cambios de las estructuras espaciales como sistemas dinámicos complejos.

Los modelos de simulación de crecimiento urbano basados en AC consideran los siguientes elementos (Aguilera Benavente *et al.*, 2012):

- a) Estructura de base raster: su capacidad de integración con un SIG, permite disponer de un modelo de representación de la estructura espacial para la existencia de los autómatas, es decir, que cada celda o píxel de la matriz raster formada por  $n \times m$  celdas de área de estudio, contendrá a un autómata.
- b) Conjunto finito de estados: hace referencia a la pertenencia de cada autómata a un determinado estado, dentro del conjunto de las categorías de usos del suelo.
- c) Definición de vecindad: en esta instancia se decide el alcance espacial de la influencia de cada autómata, es decir, el conjunto de celdas que tendrán incidencia en la definición de pertenencia de las categorías de usos del suelo.
- d) Conjunto de reglas de transición: hace referencia al criterio adoptado para determinar el cambio de estado de un autómata, teniendo en cuenta su estado inicial y el estado de las celdas vecinas. En este sentido, un cambio de estado se dará a partir de los valores de aptitud para la transición a otra categoría.
- e) Secuencia de tiempos: corresponde a las iteraciones de la regla de transición para cada autómata, donde se define si su estado se mantiene o cambia a través del tiempo.

Para la presente investigación, se ha seleccionado el método CA–Markov, que se encuentra integrado en el software IDRISI. Este método genera un resultado de predicción de cambios de usos del suelo a partir de combinar la técnica de los Autómatas celulares, Cadenas de Markov y Evaluación multicriterio/multiobjetivo (MOLA). La potencialidad de esta propuesta desde el ámbito del análisis espacial, radica en que ofrece tanto la inclusión del factor de contigüidad espacial y la probabilidad de la distribución espacial de las transiciones según cadena de Markov, lo cual lo convierte en un modelo predictivo de alta capacidad para modelar la dinámica de fenómenos complejos.

### 4. Calibración y validación del modelo

La fase de calibración y validación resulta de suma importancia al momento de evaluar la capacidad de predicción del modelo de cambios de usos del suelo, es decir, cuando se pretende medir el grado de ajuste del modelo comparado con la realidad. Para ello, se procede a considerar el comportamiento de los cambios en un periodo conocido, y utilizar los parámetros resultantes como prueba para la validación de la proyección futura.

El análisis comparativo entre el modelo proyectado y el mapa real, se realiza a partir del índice Kappa de correspondencia. Este índice brinda medidas cuantitativas de la precisión proporcional o exactitud entre los resultados proyectados por el modelo y aquellos que se dan en la realidad<sup>2</sup>.

Se procede a partir de la tabulación cruzada para comparar la correspondencia espacial entre ambas capas temáticas de usos del suelo, a partir de la cual se realizan los cálculos de porcentajes de coincidencias y el índice kappa. El primero se calcula como la sumatoria de la diagonal de la matriz de tabulación cruzada dividido por el conteo total de píxeles multiplicado por cien. Este procedimiento se realiza a partir de la siguiente fórmula:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{n} \times 100$$

donde  $PC$  es el porcentaje de correspondencia,  $x_{ii}$  son los valores de la diagonal de la matriz,  $r$  es la cantidad de filas y  $n$  la cantidad de píxeles.

Apoyado en los resultados del cruce tabular, el índice Kappa se calcula de la siguiente forma:

$$K = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)}$$

donde  $P(A)$  representa la coincidencia de píxeles entre ambos mapas y  $P(E)$  representa la proporción de acuerdo esperado sobre la distribución observada.

Los valores arrojados por este índice varían entre -1 y 1. El valor extremo negativo indica una correlación en sentido inverso, y, por el contrario, un valor de 1, indica una correlación positiva perfecta. La ausencia de correlación se dará en valores próximos a 0. Valores superiores a 0,75 se consideran como parámetro de una buena correlación.

## CONSIDERACIONES FINALES

El trabajo ha desarrollado los principales procedimientos metodológicos vinculados a la modelización espacial prospectiva en el marco de la Geografía Aplicada basada en el uso de los Sistemas de Información Geográfica. El estudio se centra en el crecimiento urbano y su incidencia en los cambios de usos del suelo en la cuenca del río Luján. De esta manera, se procedió a la sistematización de las técnicas de Autómatas celulares, Cadenas de Markov y Evaluación multicriterio, con la finalidad de lograr el modelo prospectivo hacia el año 2030.

Los procedimientos metodológicos explicitados han generado información de base para la realización del diagnóstico espacial y la formulación de propuestas de áreas de aptitud para el crecimiento urbano futuro, que, utilizadas en el ámbito de la gestión, serán de suma utilidad para lograr un desarrollo sostenible en la región de la cuenca del río Luján.

---

<sup>2</sup> El procedimiento de validación considera varios componentes, como estadísticas asociadas al índice general, tales como kappa estándar, kappa para cantidad y kappa para ubicación, que han sido incluidos en el módulo de Validación del software Idrisi.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Buzai, G.D.; Baxendale, C. (2011) *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires: Lugar Editorial. (Tomo 1).
- Buzai, G.D.; Baxendale, C. (2013). Aportes del análisis geográfico con Sistemas de Información Geográfica como herramienta teórica, metodológica y tecnológica para la práctica del ordenamiento territorial. *Persona y Sociedad*. 27(2):113-141.
- Buzai, G.D.; Lanzelotti, S. (2019). Atlas de Geografía Humana de la cuenca del río Luján. Instituto de Investigaciones Geográficas. Luján.
- Carter, H. (1983). *El estudio de la Geografía Urbana*. Instituto de Estudios de Administración Local. Madrid.
- Eastman, J.R.; Kyem, P.A.K.; Toledano, J.; Jin, W. (1993). *GIS and Decision Making*. United Nation Institute for Training and Research. Geneva.
- Gómez Delgado, M.; Barredo Cano, J.I. (2006). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. Alfaomega-Rama. México.
- Gómez Delgado, M.; Rodríguez Espinosa, V.M. (2012). Análisis de la Dinámica Urbana y Simulación de Escenarios de Desarrollo Futuro con Tecnologías de la Información Geográfica. Ra-Ma. Madrid.
- Humacata, L. (2017). Análisis espacial de los cambios de usos del suelo en partidos de la franja urbano-rural de la Región Metropolitana de Buenos Aires, en el periodo 2000-2010, mediante la aplicación de Tecnologías de la Información Geográfica. Tesis de Maestría en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Azul.
- Humacata, L. (2022). Análisis espacio-temporal de cambios de coberturas y usos del suelo en la cuenca del río Luján (1990-2010). *Revista Huellas*, Volumen 26, N° 1. Recuperado a partir de: <http://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/huellas>
- Linares, S. (2015). Aplicación de modelos de simulación de crecimiento urbano. En Buzai, G.D.; Cacace, G.; Humacata, L.; Lanzelotti, S.L. (Comp.). 2015. *Teoría y métodos de la Geografía Cuantitativa. Libro 1: Por una Geografía de lo real*. MCA Libros. Mercedes.
- Malczewski, J. 1999. *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons. New York
- Matteucci, S.; Morello, J.; Buzai, G.; Baxendale, C.; Silva, M.; Mendoza, N.; Pengue, W.; Rodriguez, A. (2006). *Crecimiento urbano y sus consecuencias sobre el entorno rural. El caso de la ecorregión pampeana*. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires.
- 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*, n° 3, 2003, p. 22-44.
- Pineda Jaimes, N.; Principi, N. (2019). Análisis espacial de cambios de usos del suelo con Sistemas de Información Geográfica. En Buzai, G.D.; Humacata, L.; Lanzelotti, S.; Montes Galbán, E.; Principi, N. (2019). *Teoría y métodos de la Geografía Cuantitativa. Libro 2: Por una Geografía Empírica*. Instituto de Investigaciones Geográficas. Universidad Nacional de Luján. Luján.
- Plata Rocha, W.; Gómez Delgado, M.; Bosque Sendra, J. (2009). Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta Nova. Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. Universidad de Barcelona.

Pontius, R.G., Shusas, E.; McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 101: 251-268.

Tomlin, C.D. (1990) *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Englewood Clift: Prentice Hall.

---

Recibido: 2 de mayo de 2025 / Aprobado: 28 de mayo de 2025 / Publicado: 30 de mayo de 2025

© 2025 Los autores



Esta obra se encuentra bajo Licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0. Internacional. Reconocimiento - Permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas siempre y cuando reconozca y cite al autor original. No Comercial – Esta obra no puede ser utilizada con fines comerciales, a menos que se obtenga el permiso.

---