

## DINÁMICA DE CRECIMIENTO DE LA CIUDAD DE CHIHUAHUA UTILIZANDO PERCEPCIÓN REMOTA Y AUTÓMATAS CELULARES - MARKOV

Jesús Alejandro PRIETO AMPARÁN <sup>a,\*</sup>, Carmelo PINEDO ALVAREZ <sup>a</sup>, Alfredo PINEDO ALVAREZ <sup>a</sup>, Federico VILLARREAL GUERRERO <sup>a</sup>, María Concepción MORALES CHÁVEZ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> UACH-Facultad de Zootecnia y Ecología, Periférico Francisco R. Almada Km 1, Chihuahua, Chih. 31000, Méx. \*[jesus\\_prieto06@hotmail.com](mailto:jesus_prieto06@hotmail.com)

### RESUMEN

El crecimiento urbano, producto del aumento de la población, incrementa la demanda recursos naturales y tiene un impacto en el paisaje natural. Los objetivos de este estudio fueron determinar los cambios de uso de suelo durante el período 1989-2014 y generar escenarios del comportamiento de esta variable para los años 2019 y 2024. El área de estudio comprendió el área urbana y conurbada de la ciudad de Chihuahua. Para ello, se identificaron las clases de usos del suelo de (1) agricultura, (2) asentamiento humano, (3) matorral, (4) pastizal, (5) bosque, (6) cuerpos de agua y (7) vegetación ribereña. La precisión de las clasificaciones obtenidas se validó con el índice  $K_{APPA}$ . Para generar los escenarios se utilizaron los métodos de Markov y Autómatas Celulares. El matorral ocupaba un 54.53% de la superficie en 1989 y se redujo a un 48.05% en 2014. El pastizal redujo su superficie de 23.5% a 16.01% durante 2009-2014. En contraste, el área urbana presentó el mayor incremento de superficie (13.6 % en 1989 a 28.6 % en el 2014). Los métodos de Markov y Autómatas Celulares mostraron que para 2019 y 2024 el área urbana continuará creciendo principalmente sobre las áreas aledañas de pastizales y matorrales. Las herramientas presentadas en este estudio son valiosas para el análisis de la evolución espacial del paisaje como efecto del crecimiento urbano.

**Palabras clave:** Markov, Landsat, Probabilidad de Transición, Uso de Suelo, Simulación de escenario.

### ABSTRACT

An increase in population involves a rapid urban growth and increments the demand for natural resources. This has an impact on the natural landscape. This study aimed to determine the changes in land use and vegetation during the period 1989-2014 and to generate scenarios of land-use changes and vegetation for the years 2019 and 2024. The study included the urban and nearby natural areas of Chihuahua city. For that, the following classes of land use were identified: (1) agriculture, (2) human settlement, (3) bushes, (4) pasture, (5) forest, (6) water bodies and (7) riparian vegetation. The precision of the classifications was assessed with the  $K_{APPA}$  index. The scenarios were generated following the Markov and Cellular Automata methodologies. The shrublands was occupying 54.53% of the area in 1989 and decreased it to 48.05% in 2014. The grasslands reduced its area from 23.5% to 16.01% during the period 2009-2014. In contrast, the urban area presented the highest increment in its area (13.6% in 1989 to 28.6% in 2014). The methodologies employed showed that for the years of 2019 and 2024 the urban area would continue expanding impacting mainly the grasslands and shrublands areas. Furthermore, these methodologies are valuable for analyzing the influence of urban growth over the areas of grasslands and shrublands.

**Keywords:** Markov, Landsat, Transition Probability, Land Use, Scenario Simulation.

## 1 INTRODUCCIÓN

El aumento de la población y la urbanización involucra procesos complejos de cambios de uso de suelo (Yu y Ng, 2007). Las áreas urbanas cubren una pequeña fracción de superficie del planeta (2%). Diversos estudios han demostrado que su crecimiento ha alterado de manera significativa el paisaje natural (He *et al.*, 2008). La expansión de tierras urbanas y agrícolas sobre tierras de matorral, bosque y pastizal han tenido como consecuencia la fragmentación y la degradación de los suelos (Manjarrez *et al.*, 2015). Muchas de las técnicas de detección de cambios han sido desarrolladas para monitorear la dinámica urbana empleando sensores remotos (Read *et al.*, 2002). Los métodos de comparación se basan en el análisis multitemporal de imágenes de satélite (Pinedo *et al.*, 2008). El uso de modelos para el análisis multitemporal como Cadenas de Markov y Autómatas Celulares son más completos ya que incorporan el efecto de la interacción espacial y la dinámica temporal (Mitsova *et al.*, 2011). Este estudio se estructura en dos etapas: 1) Determinar el cambio de uso de suelo y 1989 y 2014 y, 2) Generar un escenario de cambios del uso de suelo y vegetación durante el período 2019 y 2024 mediante la aplicación de Cadenas de Markov y Autómatas Celulares-Markov.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio comprendió el área urbana y conurbada de la ciudad de Chihuahua, México. Los usos de suelo típicos del área son: área urbana, pastizal, matorral, bosque de encino, cuerpos de agua, agricultura y vegetación ribereña.

Se utilizaron cuatro escenas del sensor Landsat, con una resolución espacial de 30 m. Las escenas corresponden a los años 1989, 1999, 2009 y 2014. El área de estudio fue delimitada en las escenas con ArcMap 10.2<sup>®</sup>, siguiendo los límites de microcuencas. Estos límites fueron definidos a partir del modelo digital de elevaciones de Chihuahua disponible en el portal de INEGI.

Se obtuvieron mapas temáticos de uso de suelo por cada fecha. Las áreas de clasificación

incluyeron: (1) agricultura, (2) área urbana, (3) matorral, (4) pastizal (5) bosque, (6) cuerpo de agua y (7) vegetación ribereña. La precisión de las clasificaciones se determinó con el índice  $K_{APPA}$  (Wilkie y Finn 1996). Dichas precisiones se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Precisión de las clasificaciones

Uso de suelo y vegetación	Precisión			
	1989	1999	2009	2014
Agricultura	0.8173	1.0000	1.0000	1.0000
Asentamiento Humanos	1.0000	1.0000	0.8327	1.0000
Matorral	0.6101	0.8567	0.5738	0.4361
Pastizal	0.8304	0.8025	1.0000	0.5130
Bosque de Encino	0.8681	1.0000	1.0000	1.0000
Cuerpos de Agua	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Vegetación Ribereña	1.0000	1.0000	1.0000	0.8148
<b>Precisión General <math>K_{APPA}</math></b>	0.8751	0.9513	0.9152	0.8234

Posteriormente, se aplicó la metodología de Markov para determinar la probabilidad de cambio de uso de suelo (Mousivand *et al.*, 2007). A continuación, Cadenas de Markov y Autómatas Celulares se implementaron para simular la cobertura del suelo de 2009 y. Los módulos de Markov así como los de Autómatas Celulares se encuentran disponibles en Idrisi Selva<sup>®</sup>. Para los escenarios de usos de suelo futuros se utilizaron periodos de 5 años. Las coberturas de uso de suelo que se simularon fueron para los años 2019 y 2024.

La susceptibilidad del terreno para cambiar de un tipo de uso de suelo a otro se estableció a través de criterios. Estos fueron; elevación, pendiente, distancia a los ríos y distancia a las carreteras las cuales no tuvieron cambios durante los 25 años comprendidos por la fechas de la primer y última escena. La validación de la predicción de cambios de los usos de suelo se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados de la simulación con respecto al uso de suelo de la clasificación supervisada de los años 2009 y 2014.

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las clasificaciones supervisadas muestran una ganancia de superficie para el área urbana y una

pérdida para el matorral, pastizal y agricultura (Figura 1). El suelo agrícola contaba con un 4.12% en 1989 y se redujo a 3.48% en 2014. El bosque de encino contaba con el 2.89% y se redujo a 2.86% en 2014. Los cuerpos de agua incrementaron su superficie de 0.067% a 0.108%. La vegetación ribereña se redujo de 1.3% a 0.91% de 1989 a 2014. El matorral representaba el 54.53% de la superficie en 1989 y redujo su superficie a 48.05% en 2014. El pastizal presentó una tendencia similar a la del matorral al reducirse su superficie de 23.5% en 1989 y a 16.01% en 2014. El área urbana ocupaba el 13.57% en 1989 y se incrementó a más del doble (28.57%) en 2014 (Figura 2).

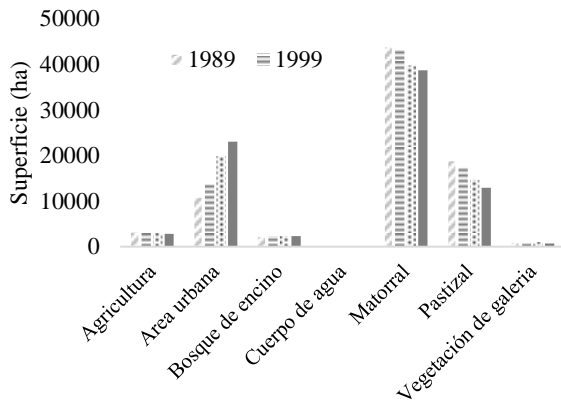


Figura 1. Comportamiento de los usos de suelo y vegetación en Chihuahua (1989-2014).

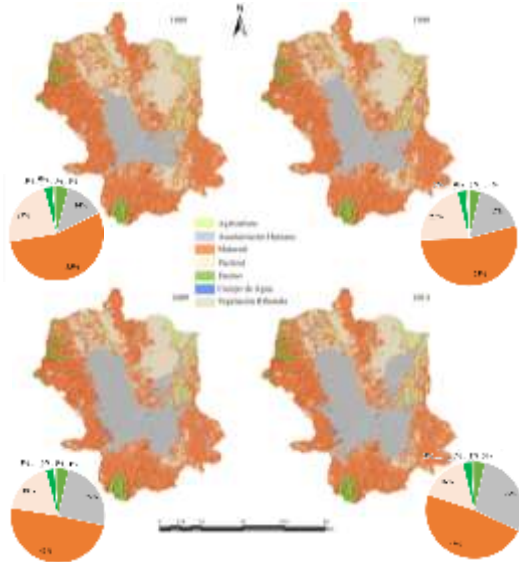


Figura 2. Mapas de clasificación supervisada de la ciudad de Chihuahua (1989-2014).

Las probabilidades de transición de usos de suelo para los períodos 1989-1999, 1999-2009, 2009-2014 se muestran en la Tabla 2. Esta matriz de transición indica que la agricultura, el matorral, el bosque de encino, los cuerpos de agua y el área urbana tuvieron un comportamiento estable, con tendencia a permanecer en el mismo uso de suelo durante los períodos 1989-1999 a 2009-2014. Las probabilidades de los usos de suelo estuvieron entre 0.8 y 0.9. En cambio, para el caso del pastizal hubo un decremento en la probabilidad de transición de 0.82 durante 1989-1999, a 0.75 para el periodo 1999-2009 y de 0.79 para el periodo 2009-2014. La validación se llevó a cabo con el índice de  $K_{APPA}$  para los años 2009 y 2014 (Tabla 3).

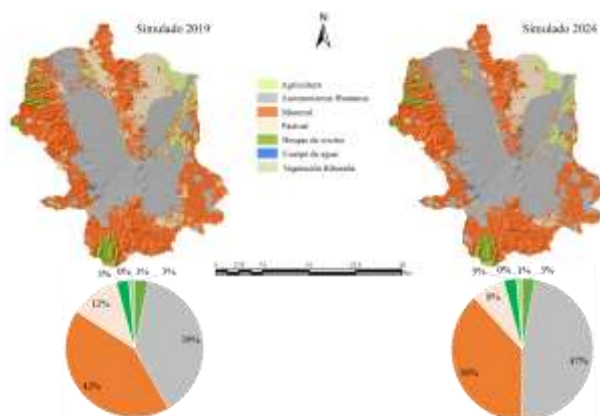
Tabla 2. Matriz de probabilidad de transición de usos de suelo en Chihuahua (1989-2014).

Uso de suelo y vegetación	Año	Agricultura	Área Urbana	Matorral	Pastizal	Bosque de Encino	Cuerpo de Agua	Vegetación Ribereña
Agricultura	1989-1999	<b>0.8139</b>	0.0501	0.1360	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	1999-2009	<b>0.8306</b>	0.1693	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
	2009-2014	<b>0.8558</b>	0.1442	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	1989-1999	0.0000	<b>0.8984</b>	0.1016	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Área Urbana	1999-2009	0.0000	<b>0.8973</b>	0.1027	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2009-2014	0.0167	<b>0.9000</b>	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167
	1989-1999	0.0000	0.1175	<b>0.8736</b>	0.0086	0.0000	0.0004	0.0000
	1999-2009	0.0074	0.1540	<b>0.8233</b>	0.0024	0.0000	0.0010	0.0120
Matorral	2009-2014	0.0000	0.1282	<b>0.8706</b>	0.0012	0.0000	0.0000	0.0000
	1989-1999	0.0000	0.1688	0.0054	<b>0.8258</b>	0.0000	0.0000	0.0000
	1999-2009	0.0000	0.2315	0.0159	<b>0.7525</b>	0.0000	0.0001	0.0000
	2009-2014	0.0000	0.2087	0.0000	<b>0.7913</b>	0.0000	0.0000	0.0000
Bosque de Encino	1989-1999	0.0000	0.0000	0.1107	0.0000	<b>0.8893</b>	0.0000	0.0000
	1999-2009	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	<b>0.9000</b>	0.0167	0.0167
	2009-2014	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	<b>0.9000</b>	0.0167	0.0167
	1989-1999	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	<b>0.9000</b>	0.0167
Cuerpo de Agua	1999-2009	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	<b>0.9000</b>	0.0167
	2009-2014	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	<b>0.9000</b>	0.0167
	1989-1999	0.0292	0.0000	0.2910	0.0010	0.0000	0.0113	<b>0.6676</b>
	1999-2009	0.0000	0.1632	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	<b>0.8368</b>
Vegetación Ribereña	2009-2014	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	0.0167	<b>0.9000</b>

**Tabla 3.** Resultados de validación  $K_{APPA}$  para los usos de suelo y vegetación simulados de 2009 y 2014.

Cobertura Terrestre	Precisión entre Real y Simulado	
	2009	2014
Agricultura	0.8797	0.8563
Área Urbana	0.7863	0.6969
Matorral	0.8986	0.9542
Pastizal	0.8454	0.854
Bosque de Encino	0.9949	0.9949
Cuerpos de Agua	0.9917	0.9927
Vegetación Ribereña	0.9204	0.9898
<b>Precisión General <math>K_{APPA}</math></b>	0.9024	0.9055

Para la simulación del uso de suelo de 2019 se utilizaron los resultados de la matriz de probabilidad de transición de 2009-2014. Posteriormente, se generó el uso de suelo del 2024 utilizando los resultados de la matriz de probabilidad de transición de 2014-2019. Los resultados muestran que para 2019 y 2014 el área urbana continuará en crecimiento, impactando principalmente al pastizal (Figura 4).

**Figura 4.** Uso de suelo para el año 2019 y 2024 mediante CA\_Markov.

#### 4 CONCLUSIONES

Las metodologías de Markov y Autómatas Celulares Markov empleadas en este estudio mostraron ser útiles para el análisis de la dinámica de cambios pasados y para la simulación de escenarios de cambios futuros de usos de suelo.

El monitoreo de los cambios de uso de suelo y vegetación es útil para la toma de decisiones en la

gestión de los recursos naturales. El área urbana es el principal uso de suelo del área de estudio. El matorral y el pastizal son los usos de suelo más susceptibles de cambiar a otro tipo de uso de suelo. Los escenarios de los años 2019 y 2024 muestran un patrón de crecimiento urbano hacia el norte y el suroeste de la ciudad. El crecimiento será producto del incremento habitacional y el establecimiento de industrias maquiladoras cerca de las principales vías de comunicación.

#### AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Zootecnia y Ecología por los conocimientos que me ha otorgado. Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo en la realización de este trabajo.

#### REFERENCIAS

- Domínguez, C., Pinedo, A., Pinedo, C., Villareal, F., Palacios, L. 2015. Vegetation landscape analysis due to land use change on arid lands. *Polish Journal of Ecology* 63:
- He Ch; Okada N., Zhang Q. Shi P. Li J. 2008. Modelling dynamic urban expansion processes incorporating. *Landscape and Urban Planning*, vol. 86, 79–91.
- Mitsova, D., Shuster, W., Wang, X. 2011. A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning* 99:141–153.
- Mousivand, A.J., Alimohammadi Sarab, A., Shayan, S. 2007. A new approach of predicting land use and land cover changes by satellite imagery and Markov chain model (Case study: Tehran). MSc Thesis. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- Pinedo, A. 2008. Modelación de atributos de bosques templados con Landsat TM y Spot-HRV e índice de sitio como indicador de productividad, tesis Doctoral, Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.
- Read, J.M., Lam, N.S.-N. 2002. Spatial methods for characterizing land cover and detecting land-cover changes for the tropics. *Int. J. Remote Sens.* 23: 2457–2474.

Wilkie, D.S., Finn, J.T. 1996. Remote Sensing Imagery for Natural Resources Monitoring. Columbia University Press, New York.

Yu X.J, Ng C.N. 2007. Spatial and temporal dynamics of urban sprawl along two urban-rural transects

A case study of Guangzhou, China. Landscape and Urban Planning 79:96-109. Planning 87:269-27