

Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo

Roberto Reynoso Santos email: reynoso.roberto@inifap.gob.mx
Campo Exp. Centro de Chiapas, Centro de Investig. Regional Pacífico Sur, INIFAP. México.

José René Valdez Lazalde email: valdez@colpos.mx
Postgrado en Ciencias Forestales, Campus Montecillo. COLPOS. México.

Miguel Jorge Escalona Maurice email: escalona@colpos.mx
Postgrado en Desarrollo Rural. Campus Montecillo. COLPOS. México

Héctor Manuel de los Santos Posadas email: hmsantos@colpos.mx
Postgrado en Ciencias Forestales, Campus Montecillo. COLPOS. México

María Jesús Pérez Hernández email: mjesus_18@hotmail.com
Postgrado en Edafología, Campus Montecillo. COLPOS. México.

RESUMEN

Se proyectó un escenario de uso del suelo en la cuenca del río Metztitlán al 2025 utilizando cadenas de Markov-autómatas celulares. Se utilizó un mapa generado para 2007 con imágenes Landsat 5 y Landsat 7 e imágenes SPOT 5 y 6 para 2013. La agricultura de temporal, la agricultura de riego y el bosque experimentarán un decremento en superficie. Los usos de suelo urbano, matorral, y matorral erosionado muestran un incremento en superficie. Las probabilidades de permanencia muestran que el uso urbano no representa una amenaza para el bosque con 1,7 %. Se registró una tasa positiva de deforestación para la superficie leñosa (1,42 %). Se recomienda que en futuras modelaciones se consideren variables de tipo socioeconómico y biofísico que puedan explicar con mayor detalle los procesos que limitan o favorecen el cambio de uso de suelo.

Palabras clave: autómatas celulares, cadenas de Markov, cambio de uso del suelo, Landsat, SPOT.

Markov Chains and cellular automata for modeling land use change

ABSTRACT

A scenario of land use was projected in the basin of river Metztitlan to 2025 using Markov chains-cellular automata. A generated map for 2007 Landsat 5 and Landsat 7 images and SPOT 5 and 6 images for 2013 was applied. The irrigation agriculture, the unwatered agriculture and the forest will experience a decrease in surface. The uses of urban land, scrub and eroded scrub show a surface increase. The odds of permanence show that urban use poses no threat to the forest with 1,7%. A positive rate of deforestation for woody surface (1,42%) was recorded. For further modeling it is highly recommended to consider socioeconomic and biophysical variables to explain in more detail the processes that could either limit or enhance land use change.

Keywords: cellular automata, Markov chains, land use change, Landsat, SPOT.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de cambio de uso de suelo recientemente se han considerado como herramientas importantes para analizar las causas y consecuencias de la dinámica de cambio de uso del suelo. Los cambios de uso y cobertura del suelo más importantes que deben ser estudiados son derivados de factores antropogénicos, puesto que tienen un impacto sobre los ecosistemas terrestres, la pérdida y la fragmentación de hábitat, y crean impactos negativos sobre la vida humana (Shahidul and Ahmed 2011).

Debido a lo anterior, existe la necesidad de mejorar el entendimiento de la dinámica de cambio de uso de suelo a través de modelos y proyecciones a escalas globales, regionales y temporales, particularmente con un enfoque sobre la explicación espacial de los procesos y resultados (Nayaran et al. 2014).

Actualmente, con los avances en la tecnología de sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG) se han desarrollado modelos con capacidad adecuada para modelar y predecir el cambio del uso y la cobertura del suelo. También, se han desarrollado varios enfoques para modelar y predecir la dinámica de cambio de uso de suelo (Shahidul and Ahmed 2011), (Narayan et al. 2014), (Kumar et al. 2014).

La cuenca de Metztitlán se ubica en el centro de México, es considerada el corazón agrícola del estado de Hidalgo y una de las más importantes del país, tanto por su superficie como por el volumen de sus escurrimientos. Recientemente se reportó un análisis de la dinámica de cambio de uso de suelo para el periodo 2007-2013, encontrando importantes cambios en el uso urbano, en la superficie agrícola y en el área forestal (Reynoso et al. 2015).

En este sentido, existe la necesidad de evaluar periódicamente los cambios de uso y de cobertura del suelo y predecir un escenario futuro de la cuenca Metztitlán. Este documento reporta un análisis de proyección de cambios basado en un enfoque híbrido de modelado con cadenas de Markov-autómatas celulares. Este enfoque híbrido ha sido usado ampliamente en la modelación de cambio de uso de suelo (Subedi et al. 2013).

LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Metztitlán, con una superficie de 329053 ha se ubica dentro de los paralelos 19°53'41'' y 20°45'05'' latitud norte y los meridianos 98°55'04'' y 98°08'39'' longitud oeste. Se distribuye transversalmente en el estado de Hidalgo (89,9 %), Veracruz (6,4 %) y Puebla (3,7 %) (figura1). Se considera el corazón agrícola del estado de Hidalgo con dos distritos de riego, el de Metztitlán (DR 008) y el de Tulancingo (DR 028). Este último es uno de los más importantes de México, después de los distritos del norte del país. La cuenca se origina en el estado de Puebla, con un intervalo de altitud que va desde los 3100 m en la Sierra de Singuilucan hasta 1250 m en la laguna Metztitlán.

La cuenca presenta una amplia variedad de climas, con predominancia del templado subhúmedo (Cw1, Cw2), semiárido templado (BS, Cf), templado subhúmedo con verano muy lluvioso (Cw1, Cw2) (800-1000 mm de precipitación anual) y templado húmedo (Cf). Su

temperatura oscila entre 12 y 18 °C. Dentro de los tipos de suelos predominantes se encuentran Phaeozem (25,9 %), Luvisol (19,5 %), Vertisol (16,8 %), Cambisol (7,7 %) y Regosol (7,1 %).

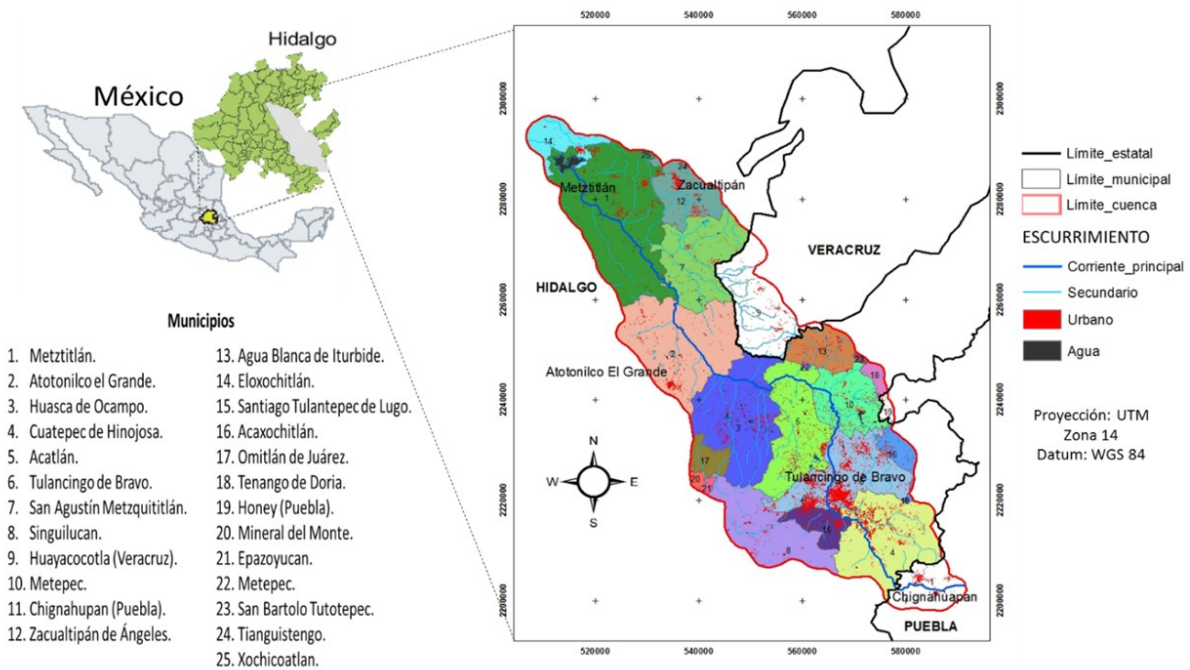


Figura 1. Localización de la cuenca del río Metztlán

DESARROLLO

Bases de datos

Se usaron dos mapas de cobertura vegetal y de uso del suelo previamente generados para los años 2007 y 2013 (figura 2). El primero de ellos fue generado a partir de una imagen multispectral Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) 2007. El mapa correspondiente a 2013 se generó a partir de un mosaico compuesto de cuatro imágenes SPOT 5 y una SPOT 6 (figura 2) (Reynoso et al. 2015).

Cada mapa fue generado de manera independiente a través de un proceso de clasificación supervisado con el algoritmo de máxima verosimilitud en el paquete de cómputo ERDAS Imagine, registrando valores aceptables del estadístico Kappa (91,5 y 91 %, respectivamente). Las clases temáticas generadas para ambas clasificaciones fueron: 1) agricultura de riego (AR), 2) agricultura de temporal (AT), 3) cuerpo de agua (AGUA), 4) bosque de pino (BP), 5) bosque de encino (BE), 6) bosque de pino-encino (BPE), 7) matorral (MT), 8) matorral erosionado (MTE), 9) pastizal (PZ) y 10) urbano (UR).

Ambas clasificaciones fueron homologadas al sistema de coordenadas y proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) zona14 N y datum WGS84, con el mismo número y tipo de clases temáticas y una resolución espacial de 30 m. Estos mapas fueron exportados a formato tiff

para su posterior análisis con el software IDRISI Selva (versión 17,0), con la finalidad de realizar la predicción de cambio de uso de suelo a través del modelo cadenas de Markov-autómatas celulares. Los mapas finales fueron reclasificados en las clases de bosque (BP, BE y BPE) para disminuir el número de categorías a analizar.

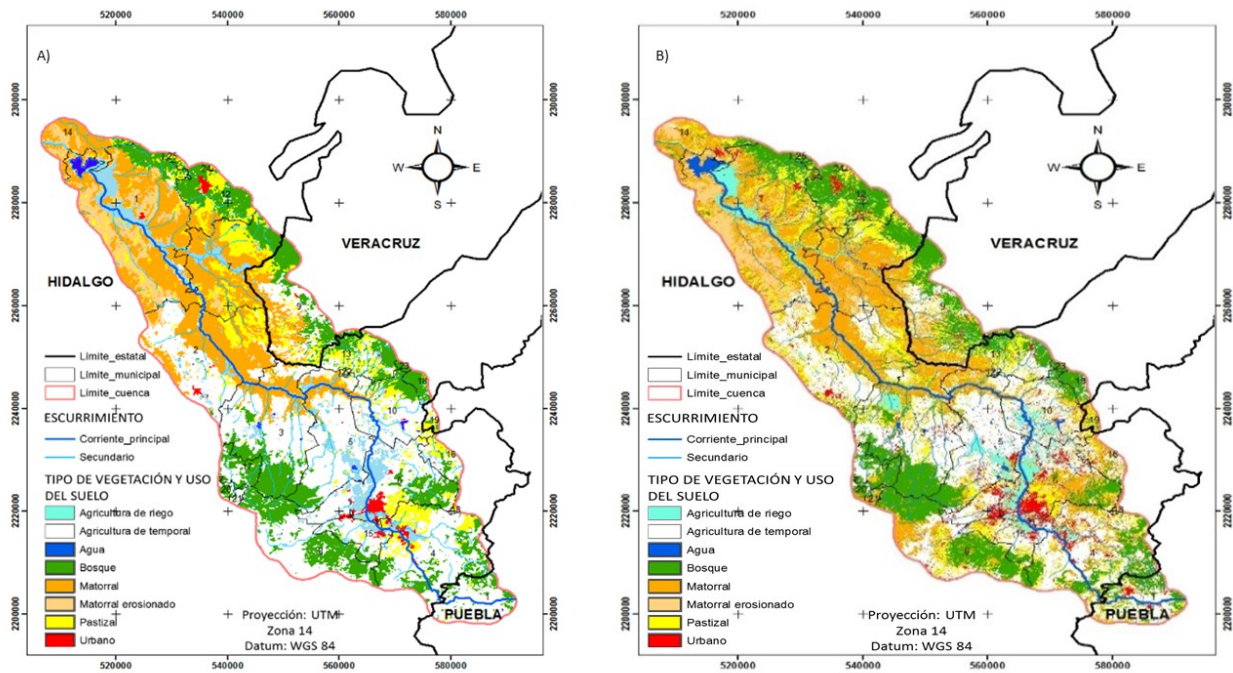


Figura 2. A) Mapa uso de suelo de cuenca Metztlán generado con imagen Landsat 7 ETM+ (2007)

B) Mapa uso de suelo de cuenca Metztlán generado con imagen SPOT 5 y 6 (2013)

Generación de las probabilidades de transición y área de transición de cambio de uso de suelo a través del modelo de Markov

A través del módulo cadenas de Markov, se ingresaron los mapas de uso de suelo del año 2007 y 2013, y se ejecutó el algoritmo con un margen de error del 15 %. A partir de la tabulación cruzada de las imágenes analizadas se obtuvo una matriz de probabilidad de transición y una matriz del área de transición para proyectar el uso de suelo en un período de 12 años ($t_2 = 2025$). La matriz de probabilidad de transición determina la probabilidad de que un píxel en una clase de uso de suelo cambie a otra clase durante el período analizado. La matriz del área de transición contiene el número de píxeles que se espera cambien de una clase de uso de suelo a otra durante un período de tiempo (Subedi et al. 2013).

Además del análisis anterior se estimó una tasa de deforestación futura, entre la clasificación 2013 y el escenario obtenido para 2025. Con esto se obtuvo el porcentaje de cambio anual en los usos de suelo B (BP, BE, BPE) MT, MTE a AR, AT, PZ y UR mediante la ecuación (1) propuesta por Palacio-Prieto et al. (2004).

$$Td = [(S_2/S_1)^{(1/n)} - 1] * 100 \quad (1)$$

donde: Td = tasa de deforestación anual en porcentaje, S_2 = área arbolada en el año final, S_1 = área arbolada en el año inicial y n = número de años del periodo de análisis.

Generación del mapa de uso de suelo 2025 a través del modelo cadenas de Markov-autómatas celulares

El modelo de Markov-autómatas celulares usa los resultados del modelo de Markov, combinados con evaluación multicriterio y asignación de tierras multiobjetivo para agregar contigüidad espacial a la matriz del área de transición al 2025 generada a través del modelo de Markov.

Por otra parte, debido a que la proximidad física a una clase de uso de suelo existente se considera como un impulsor del cambio a otra clase de uso de suelo en el futuro (Subedi et al. 2013), se consideraron la distancia a caminos y a ríos como variables detonadoras de cambio. Además, se consideró como restricción del uso de suelo al límite de la reserva de la biosfera Barranca de Metztitlán.

Con las variables físicas consideradas, el límite de la reserva, y a través de una evaluación multicriterio con el método de intersección Booleana, se generó un mapa de aptitud para la generación del mapa de uso de suelo al 2025. Con dicho mapa, se corrió el modelo de Markov-autómatas celulares con 12 iteraciones y un filtro de contigüidad de 5*5 píxeles para generar el mapa simulado al 2025.

Congruencia del mapa de cambio de uso de suelo 2025

Como una manera de evaluar la congruencia (precisión) del modelo de Markov-autómatas celulares para la proyección 2025, se usó un mapa de uso de suelo del 2000 generado a través de imágenes Landsat 7 ETM+ 30 m y el mapa de uso de suelo 2007 (Valdez-Lazalde et al. 2011), para proyectar un mapa de uso de suelo 2013 a través de cadenas de Markov-autómatas celulares. Con el mapa generado a partir de imágenes SPOT y el mapa proyectado al 2013, se realizó una comparación de similitud entre ambos mapas usando el modulo VALIDATE de Idrisi Andes. Este módulo proporcionó el estadístico Kappa (K) para evaluar la similitud entre la clasificación actual 2013 y el mapa proyectado al 2013. Esto permitió tener una referencia sobre la precisión de la proyección al 2025 generada a base de los mapas de 2007 y 2013.

MODELO DE MARKOV-AUTÓMATAS CELULARES

Probabilidades de transición, área de cambio de uso de suelo y mapa uso de suelo al 2025

La matriz de áreas de transición generadas de acuerdo al modelo de Markov muestra que las clases de uso de suelo AT, MT y UR tendrán un cambio notable en superficie al 2025 con respecto a las clases de uso de suelo comparadas de 2013 (tabla1). Los resultados de la modelación al 2025, muestran por un lado, que el AT, AR y B tendrán un decremento en superficie. Mientras que, por el otro, los usos de suelo UR, MT y MTE muestran un incremento en su superficie (figura 3). Para el 2025 se espera que las áreas urbanas proyectadas de la cuenca Metztitlán aumenten un 2,2 % con respecto a 2013, lo cual representa un crecimiento anual bajo

con respecto al registrado durante el periodo de 1985 a 2007 (4,3 %) registrado por Valdez-Lazalde et al. (2011) y el registrado por Reynoso et al. (2015) de 26,4 %. Por otro lado, las clases de uso de suelo que tendrán mayor representación para 2025 en cuanto a superficie son MT (27,1 %), AT (20,4 %), B (18,9 %) y PZ (13,5 %) (tabla 2).

En décadas pasadas la superficie leñosa de la cuenca ha registrado una tasa negativa de crecimiento de -0,5 % (Valdez-Lazalde et al. 2011), mientras que para 2013 (Reynoso et al. 2015) y la proyección 2025 se ha registrado una tasa positiva de 2,3 y 1,42 %, respectivamente (tabla 2). Estos resultados se consideran congruentes ya que para 2025 se esperan tasas negativas de AR (-5,5 %) y AT (-4,63 %) y una tasa baja de crecimiento poblacional de 7,68 % con respecto a la registrada en 2013 (26,4 %), por lo que la presión sobre la superficie leñosa pudiera disminuir.

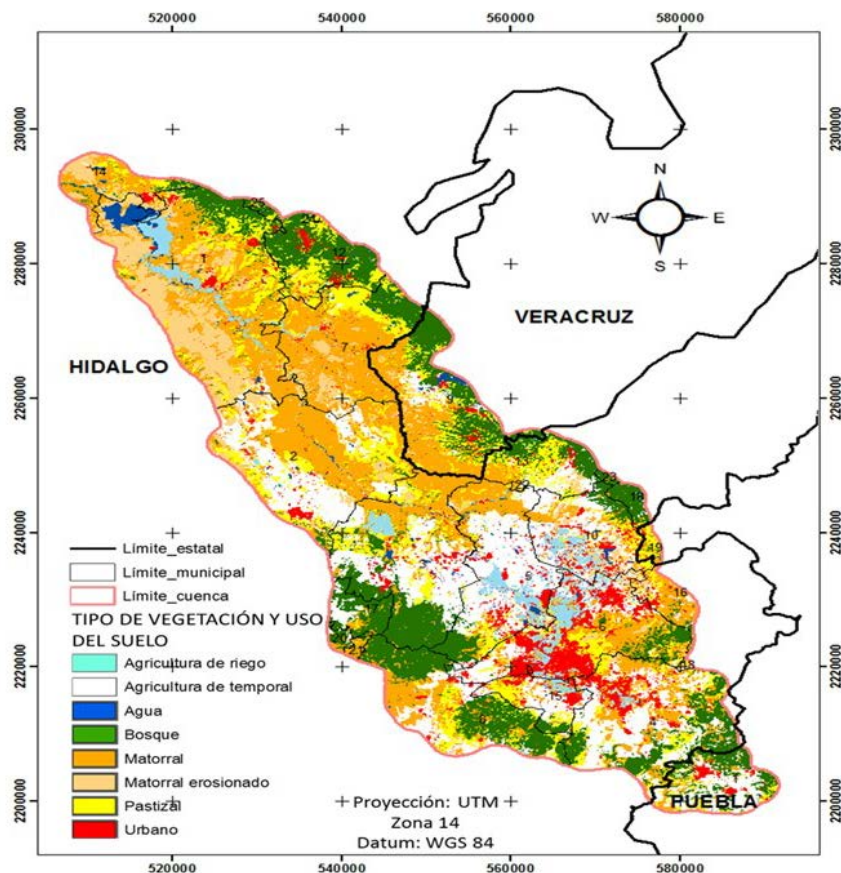


Figura 3. Mapa de uso de suelo de la cuenca Metztlán proyectado al 2025 generado con Markov-Autómatas Celulares

Existen diversos factores de tipo socioeconómico y físicos que también pudieran influir en la modelación de 2013 a 2025; sin embargo, el modelo de Markov es de tipo lineal y no considera los efectos de dichos factores sobre el cambio de uso de suelo (Pontius 2000), sino que se basa únicamente en el análisis de la dinámica interna del sistema (Paegelow et al. 2003).

Tabla 1. Matriz de área de transición al 2025 derivados de mapas de uso de suelo 2007 y 2013 a través de modelos de Markov en la cuenca Metztlán, Hidalgo

		2025								
		AR	AT	AGUA	B	MT	MTE	PZ	UR	Total
2013	AR	2,448	3,357	458	1,354	4,429	1,056	1,972	1,989	17,066
	AT	4,060	28,441	674	9,559	21,072	5,393	13,187	7,026	89,416
	AGUA	43,42	170	1,940	32	218	127	94	57	2,683
	B	992	7,629	112	34,613	11,354	1,459	6,160	1,113	63,435
	MT	2,023	11,384	686	9,253	31,369	9,967	13,511	2,199	80,396
	MTE	492	2,712	133	1,101	7,225	5,762	3,212	811	21,451
	PZ	1,296	10,564	203	5,472	11,866	3,891	5,186	2,662	41,144
	UR	781	3,013	55	1,114	1,903	294	1,168	5,124	13,455
Total		12,138	67,273	4,264	62,501	89,440	27,954	44,493	20,984	329,051

Los valores en la diagonal marcados en negrita representan las superficies que se mantendrán estables entre 2013 y 2025. Los valores transversales representan las superficies de intercambio entre las clases de uso de suelo.

Debido a esto, se consideraron como factores físicos claves las distancias a caminos y a ríos, debido a que en otros estudios de modelación del uso de suelo usando modelos multinomiales y regresión logística dentro de la cuenca Metztlán, dichos factores han resultado ser de los más importantes para la modelación. A pesar de esto, factores físicos y socioeconómicos como crecimiento poblacional, migración hacia áreas urbanas, tamaño de la familia, elevación, infraestructura, etc., pueden no estar siendo contemplados y sí tener una influencia sobre la modelación.

Tabla 2. Superficie de uso de suelo registrada en 2013 y proyección para 2025 a través de modelos de Markov en la cuenca Metztlán, Hidalgo

Clases de uso de suelo	Área registrada 2013 (ha)	Área proyectada 2025 (ha)	Tasa de cambio 2013-2025 (%)
AR	17,066 (5,1)*	12,138 (3,6)	-5,52
AT	89,416 (27,1)	67,273 (20,4)	-4,63
AGUA	2,683 (0,8)	4,264 (1,30)	8,02
B	63,435 (19,8)	62,501 (18,9)	-0,24
MT	80,396 (24,4)	89,440 (27,1)	1,79
MTE	21,451 (6,5)	27,954 (8,5)	4,51
PZ	41,144 (12,5)	44,493 (13,5)	1,31
UR	13,455 (4,0)	20,984 (6,3)	7,68

* El número entre paréntesis indica el porcentaje del área total para cada fecha estudiada.

La tabla3 presenta la matriz de probabilidad de transición de las diferentes clases de uso de suelo al 2025; las filas representan las clases de uso de suelo al 2013, mientras que las columnas representan las superficies modeladas con Markov al 2025.

De acuerdo con esta matriz de probabilidad de transición, la superficie leñosa (B, MT, MTE) tiene una alta probabilidad de permanencia en un período de 12 años (27-55 %). En 2025, destacan algunas clases de uso de suelo con alta probabilidad de permanencia, como el AGUA (70%), B (55 %), MT (40 %), UR (39 %) y MTE (27 %). Cabe señalar que las probabilidades más altas de transición del B a otros usos se registraron en las categorías de MT y AT, con 17 y 12 %, respectivamente.

El uso urbano con 1,7 % no representa una amenaza para el B, puesto que el área boscosa está restringida a las partes altas de la cuenca donde el aspecto topográfico limita en parte el crecimiento urbano (figura 4).

El MT y MTE, presentan una alta probabilidad de permanencia con 39,0 y 26,8 %, respectivamente. En ambas clases de uso de suelo, se observan valores altos de probabilidad de que estas clases cambien a AT con 14,1 y 12,6 %, respectivamente. Asimismo, estas mismas clases de uso de suelo tienen una alta probabilidad de cambio a PZ con 16,8 y 14,9 %, respectivamente. Dichas probabilidades son particularmente importantes, ya que estos ecosistemas concentran su mayor superficie en la zona de la reserva barranca de Metztlán, y para 2025 tendrán una alta probabilidad de amenaza por las actividades agrícolas (AT) y pecuarias (PZ).

Tabla3. Matriz de probabilidad de transición al 2025 derivados de mapas de uso de suelo 2007 y 2013 a través de modelos de Markov en la cuenca Metztlán, Hidalgo

		2025							
		AR	AT	AGUA	B	MT	MTE	PZ	UR
2013	AR	0,1434	0,1968	0,0269	0,0794	0,2595	0,0619	0,1156	0,1166
	AT	0,0454	0,3181	0,0075	0,1069	0,2357	0,0603	0,1475	0,0786
	AGUA	0,0162	0,0634	0,723	0,0122	0,0816	0,0474	0,0351	0,0213
	B	0,0156	0,1203	0,0018	0,5456	0,179	0,023	0,0971	0,0176
	MT	0,0252	0,1416	0,0085	0,1151	0,3902	0,124	0,1681	0,0274
	MTE	0,023	0,1264	0,0062	0,0513	0,3368	0,2686	0,1498	0,0378
	PZ	0,0315	0,2568	0,0049	0,133	0,2884	0,0946	0,1261	0,0647
	UR	0,0581	0,2239	0,0041	0,0828	0,1415	0,0219	0,0868	0,3808

Validación del mapa de cambio de uso de suelo 2025

Los resultados de la validación del mapa generado con Markov al 2013 y el mapa generado con imágenes SPOT a través del algoritmo VALIDATE de Idrisi, mostraron una alta similitud entre el mapa clasificado y los mapas de probabilidades proyectados a 2025. Todos los estadísticos Kappa estuvieron por encima del 80 % ($K_{standar} = 81,2 \%$, $K_{no} = 85,01 \%$, y $K_{locaty} = 85,2 \%$), por lo que se consideran aceptables (Viera and Garrett 2005).

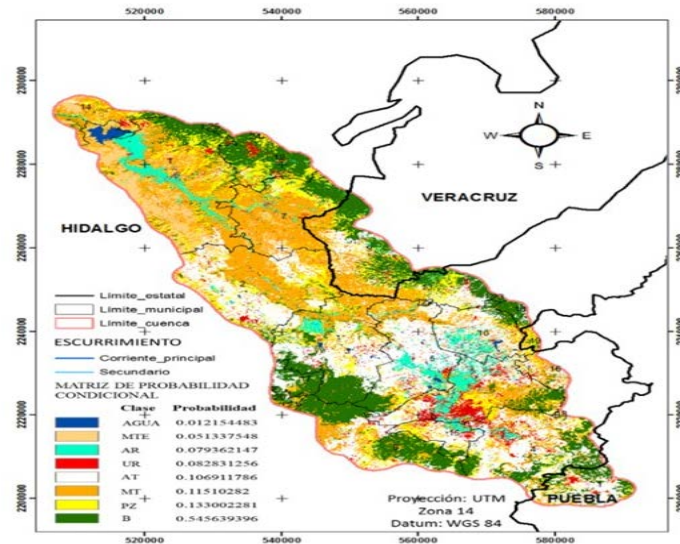


Figura 4. Mapa de probabilidad condicional proyectado con Markov al 2025 para la clase de uso de suelo bosque (B)

CONCLUSIONES

- El enfoque híbrido cadenas de Markov-autómatas celulares, muestra una tendencia positiva en la conservación de la superficie leñosa de la cuenca de Metztitlán, Hidalgo.
- Aunque se espera un crecimiento positivo en la superficie urbana, la tendencia de la superficie dedicada a la agricultura (AT y AR) se espera tenga una disminución, por lo que no representa una amenaza en cuanto a deforestación.
- A pesar de que el modelo tuvo valores aceptables del índice Kappa, deberá usarse con precaución en temas de planeación urbana dentro de la cuenca. Esto debido a que para la generación del escenario al 2025, el modelo no tomó en cuenta factores socioeconómicos y físicos tales como crecimiento poblacional, marginación, migración, elevación, pendientes, y otros factores limitantes que tienen un efecto positivo o negativo sobre el cambio de uso de suelo.

REFERENCIAS

Kumar R., Nandy S., Agarwal R., and Kuaswaha S. P. S. (2014). "Forest cover dynamics analysis and prediction modeling using logistic regression model". *Ecological Indicators* 45: 444-455, ISSN 1470-160X, Elsevier, Netherlands.

Nayaran V. M., Kumar P. R. and Mojan K. (2014). "Prediction of land use changes based on land change modeler (LCM) using remote sensing: a case study of Muzaffarpur (Bihar), India". *Journal Geographical Institute Jovan Cvijic*. 64: 111-127, ISSN 0350-7599, SASA, Belgrade, Republic of Serbia.

Paegelow M., Camacho M. O. y Menor J. T. (2003). “Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje”. *GeoFocus* 3: 22-44. ISSN 1578-5157. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, España.

Palacio-Prieto J. L., Sánchez-Salazar M. T., Casado J. M., Propin F. E., Delgado C. J., Velázquez M. A., Chias B. L., Ortíz A. M. J., González S. J., Negrete F. G., Morales J. G. y Márquez H. R. (2004). “Indicadores para la caracterización y ordenamiento territorial”. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México D.F.

Pontius R. G. Jr. (2000). “Quantification error versus location error in comparison of categorical maps”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66: 1011-1016. ISSN 0099-1112. American Society of Photogrammetry. USA.

Reynoso S. R., Valdez L. J. R., Escalona M. J. M. y de los Santos P. H. M. (2015). “Análisis de la dinámica del uso del suelo de la cuenca Metztitlán en Hidalgo, México”. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(3):102-111, ISSN 1815-591X, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.

Shahidul Md. I. and Ahmed R. (2011). “Land use change prediction in Dhaka city using GIS aided Markov chain modeling”. *Journal of Life and Earth Science*. 6: 81-89. ISSN 1990-4827, *Bangladesh Journals On Line*. Bangladesh.

Subedi P., Subedi K. and Thapa B. (2013). “Application of a hybrid cellular automaton Markov (CA-Markov) model in land-use change prediction: a case study of Saddle Creek drainage basin, Florida”. *Applied Ecology and Environmental Sciences* 1: 126-132, ISSN 2328-3912, *Science and Education*. USA.

Valdez-Lazalde J. R., Aguirre S. C. A. y Ángeles G. P. (2011). “Análisis de los cambios en el uso del suelo en la cuenca del río Metztitlán (México) usando imágenes de satélite: 1985-2007”. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* XVII: 313-324, ISSN 2007-3828. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Viera A. J. and Garrett J. M. (2005). “Understanding interobserver agreement: the Kappa statistic”. *Family Medicine* 37: 360-363, ISSN 0742-3225, Oxford University, UK.