

EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA SIERRA DEL AJUSCO, CIUDAD DE MÉXICO Y MODELADO DE ESCENARIOS DE CRECIMIENTO URBANO

Sarai Vázquez González¹, Alicia Chacalo Hilu², Armando Cortés Ortiz³, Isabelle Barois Boullard⁴ y Griselda Benítez Badillo⁵

^{1 y 2} Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, ²Departamento de Energía, ¹Posgrado en Ciencias e Ingeniería Ambientales, Dirección: Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Delegación Azcapotzalco, Código Postal 02200, Distrito Federal, México. biol.saravg@gmail.com, ach@correo.azc.uam.mx

³ Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango, Departamento de Gestión Territorial, Dirección: Sigma #119 Fracc. 20 de Noviembre II. Código Postal 34220, Ciudad de Durango, Estado Durango, México. c_armando25@hotmail.com

^{4 y 5} Instituto de Ecología, A.C./INECOL, Dirección Carretera antigua a Coatepec No. 351, El Haya Xalapa 91070, Veracruz, México. isabelle.barois@inecol.mx, griselda.benitez@inecol.mx

RESUMEN

Este trabajo pretende evaluar el cambio de uso de suelo en la Sierra Ajusco desde los 70 a la fecha por medio de SIG. Se construyeron los mapas de uso de suelo con las series I a la V (INEGI), se evaluaron los cambios de superficie de cada categoría de uso de suelo y vegetación y se realizó su validación en campo. Se desarrollaron los modelos de crecimiento urbano por medio de la técnica de cadenas de Markov y autómatas celulares, validando con la zona urbana de 2011. Se elaboró un modelo con regresión logística para conocer las variables que influían en el crecimiento urbano, además de un modelo con evaluación multicriterio, utilizando la combinación lineal ponderada.

Entre la serie I y la V la superficie urbana se incrementó 1.6 veces, de acuerdo a la imagen de satélite (Landsat 8, 2014) la superficie aumentó 3 veces. Las variables que mostraron mayor influencia en el crecimiento urbano fueron: distancia a cuerpos de agua, a vialidades y a corrientes de agua, así como la altitud, orientación, tipo de suelo, tipo de roca y cobertura de suelo. Los escenarios construidos con las cadenas de Markov y los autómatas celulares tuvieron una fuerte correlación con la zona urbana de la serie V (índice Kappa 0.98). Estos fueron usados para realizar el pronóstico de crecimiento a mediano y largo plazo. La ponderación de las variables se hizo siguiendo al índice ROC, dando mayor importancia a la altitud, seguida de la distancia a poblados, tipo de roca, distancia a calles y a corrientes.

PALABRAS CLAVE cambio de uso de suelo; cadenas de markov; autómatas celulares; regresión logística y evaluación multicriterio.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the change of land use in the Sierra Ajusco from the 1970's till to date through GIS. The maps were elaborated with the series I to V of land use maps from INEGI (National Institute of Statistics and Geography), the changes in each category of land use and vegetation surface were evaluated and validated in the field. Models of urban growth were developed using Markov chains and cellular automata, validated with the urban area of 2011. A model was elaborated with logistic regression to know the main variables influence urban growth, as well as a model with multicriteria evaluation, using weighted linear combinations.

Between series I and V, the urbanized area increased 1.6 times. According to the satellite images (Landsat 8, 2014) the surface increased 3 times. Variables that showed greater influence on urban growth were: distance to: water bodies, roads and streams, as well as the altitude, orientation, soil type, type of rock and soil cover. The scenarios built with Markov chains and cellular automata had a strong correlation with the urban area of

series V (index Kappa 0.98). These were used to make the forecast the urban growth in medium and long term. The weighting of variables was done according to the ROC index, giving greater importance given to the altitude, followed by the distance to towns, type of rock, distance to streets and streams.

Keywords: change of land use; Markov chains; cellular automata; logistic regression; multicriteria evaluation

1. INTRODUCCIÓN

La Sierra del Ajusco se ubica al suroeste de los límites de la Ciudad de México; al ser una zona con vegetación arbórea y pastizales ofrece un sinnúmero de servicios ambientales como recreación, filtración de contaminantes, recarga de acuíferos, producción de oxígeno y otros más. Además, dentro de la zona de estudio, se encuentran áreas naturales protegidas las cuales fueron declaradas en base a su riqueza de especies, importancia histórica y cultural, por las interacciones que se llevan a cabo en sus ecosistemas, entre otros.

Derivado de lo anterior, es necesario tener un conocimiento amplio sobre los cambios de uso de suelo que se han dado en la zona de estudio en las últimas décadas lo cual permite conocer las causas y consecuencias de los procesos de degradación, reducción de la biodiversidad, y por lo tanto de la provisión de los servicios ambientales. Principalmente saber qué superficie ha cambiado a un uso urbano. Es importante además, tener un registro del tipo de cobertura sobre la cual se ha ejercido mayor presión por el crecimiento urbano.

Por medio de modelos estocásticos, se realizaron algunos pronósticos acerca del crecimiento de la mancha urbana. El fin de este tipo de estudios, es dar las bases para promover un desarrollo urbano planificado, respetando en todo momento los ecosistemas allí presentes.

Este trabajo pretende evaluar el cambio de uso de suelo en la Sierra del Ajusco y sus alrededores desde la década de los setentas a la fecha, por medio de Sistemas de Información Geográfica y el modelado de escenarios de crecimiento urbano aplicando diferentes técnicas como la regresión logística, las cadenas de Markov, los autómatas celulares y el análisis multicriterio.

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Existen varios modelos predictivos para generar escenarios futuros de cambios de uso del suelo, los cuales utilizan diversas variables (Henríquez et al., 2006). Los modelos basados en transiciones espaciales utilizan métodos estocásticos como las matrices de Markov, los autómatas celulares y la evaluación multicriterio.

También hay modelos estadísticos para saber la correlación que existe entre diferentes variables y por lo tanto pueden determinar que tanto puede o no afectar una variable en otra, un ejemplo de estos modelos es la regresión logística.

- Amuzurrutia-Valenzuela et al. (2015) evaluaron la susceptibilidad de urbanización en la zona metropolitana de San Luis Potosí en México, desarrollando un modelo de regresión logística. Determinaron que la distancia a zona industrial, la elevación y el costo del uso del suelo tuvieron mayor influencia sobre el crecimiento urbano.
- Guan et al. (2011) modelaron el crecimiento urbano de la Ciudad de Saga en Japón. Por medio de cadenas de Markov y autómatas celulares. Pronosticaron para el período de 2015-2042, que las tierras ocupadas por bosques y cultivos tienen una tendencia a la baja, en cambio las zonas urbanizadas a la alta.
- Da Silva y Cardozo (2015) por medio de técnicas de análisis multicriterio identificaron los espacios potenciales para la ocupación residencial en la ciudad de Resistencia. Los resultados mostraron una buena capacidad del oeste y noroeste de la ciudad. Utilizaron como factores la altitud y la pendiente, distancia a los ríos Paraná y Negro, las coberturas de suelo, distancia a áreas ya urbanizadas, a la red vial y a las paradas de los colectivos, así como a los establecimientos educativos y centros de salud.
- En 1987 Benítez et al. realizaron una evaluación comparativa de los usos de suelo y pérdida de la cubierta vegetal entre 1959 (escala 1:50 000) y 1977 (escala 1:30 000) con fotografías aéreas de la Sierra del Ajusco, concluyendo que el proceso de urbanización como consecuencia del crecimiento de la población,

influyó en la vegetación y uso de suelo provocando cambios en la superficie y distribución de estos tipos de uso de suelo. En 1977, el área urbana fue 4.3 veces mayor que en 1959.

2.1. Hipótesis

Al conocer los cambios de uso de suelo que se han dado en la Sierra del Ajusco desde los años 70 a la fecha, se puede visualizar y contabilizar la superficie de los distintos tipos de vegetación que se han sustituido por urbanización o por otro tipo de uso de suelo. Así mismo, los modelos de crecimiento urbano podrán dar una visión del panorama futuro que podría presentarse en esta zona, lo cual podría ser útil para políticas de ordenamiento territorial, y de planeación y manejo ambiental.

3. ÁMBITO DE ESTUDIO

La zona de estudio se delimita al Norte en las coordenadas geográficas 19° 20' LN y 99° 20' LO a 19° 20' LN y 99° 10' LO. Al sur 19°10' LN y 99° 20' a 19 ° 10' LN 99° 10' LO, con una superficie total de 32,302 ha. Está ubicada al suroeste de la Ciudad de México, a una altitud entre los 2,400 y 3,800 msnm, con una topografía accidentada con la presencia de varios volcanes inactivos.

Dentro de la zona de estudio se encuentran 5 parques nacionales, también se ubican 2 reservas ecológicas comunitarias, así como 2 zonas sujetas a conservación ecológica. Además el Parque Estatal Otomí-Mexica al suroeste de la zona de estudio (SEMARNAP y RDS, 2000). Dichas reservas y parques abarcan casi e 75% del total de la superficie de estudio. Dentro de éstas zonas existe cerca del 20% con uso de agricultura y un 11% como uso urbano.

4. METODOLOGÍA

Para conocer el cambio de uso de suelo en la Sierra del Ajusco y sus alrededores, se construyeron los mapas de uso de suelo de la zona de interés en base a la información de las series I a la V (INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía); se evaluaron los cambios de superficie en hectáreas de cada categoría de uso de suelo y vegetación entre estas. A su vez, se realizó una validación en campo de cada categoría. Con estos mapas se desarrollaron los modelos de crecimiento urbano por medio de la técnica de cadenas de Markov y autómatas celulares (Akin et al. 2015), el modelo fue validado haciendo un pronóstico al año 2011 y comparando los resultados con la serie V. Se elaboró un modelo por medio de regresión logística para conocer cuáles eran las variables que influían en el crecimiento urbano (Batisani y Yarnal, 2009; Akin et al. 2015; Amuzurrutia-Valenzuela et al. 2015). Se construyó un modelo por medio de la técnica de evaluación multicriterio, utilizando la combinación lineal ponderada y realizando la ponderación de los criterios por medio de la técnica de Saaty para asignar aptitud de uso urbano a diferentes superficies de la zona.

4.1. Cálculo de cambio de superficie

Teniendo el mapa de uso de suelo (USUE) de la serie I y serie V, se asignó una clasificación común para cada categoría de USUE y un código numérico para identificarlas, con el programa Arc Map se hizo una intersección entre ambas series y se calculó la superficie de cambio a zona urbana. Con esta información se graficó el cambio de superficie ocupada por cada categoría en las cinco series, así como el porcentaje que ocupaba cada tipo de USUE en la serie I y en la serie V del total de la superficie de interés y una gráfica dónde se observa el cambio temporal de uso de suelo entre las series. Así mismo, se realizó una comparación con una imagen de satélite de Diciembre de 2014 (Landsat 8) de la zona urbanizada. Se validó en campo la clasificación de los diferentes polígonos.

4.2. Modelado con regresión logística

Para formar la matriz de datos, primero se definieron las variables explicativas que se considerarían en el modelo. Se consideraron 10 variables de acuerdo a lo reportado en literatura (Batisani y Yarnal, 2009; Akin et al. 2015; Amuzurrutia-Valenzuela et al. 2015) y asesoramiento de especialistas del tema, las cuales fueron:

orientación, pendiente, altitud, distancia a corrientes y cuerpos de agua, distancia a red vial y a zona urbana, tipo de roca, tipo de suelo y cobertura de suelo. La variable dependiente se construyó con la superficie de la zona urbana que creció entre la serie I y serie V.

En el software SPSS se corrió el módulo de regresión logística binaria, seleccionando la variable dependiente, las covariables y el método "pasos adelante". Se corrió la regresión con el total de los datos y con una muestra (40%). Con los valores del parámetro estimado (B) de cada variable se construyó la ecuación de la regresión logística con las covariables que quedaron al final del proceso.

De acuerdo a los valores de la ecuación se construyó una imagen con las zonas más probables de urbanizarse, las cuales fueron comparadas con la zona urbanizada de la serie V de INEGI.

4.3. Modelado con cadenas de Markov

Dentro del software IDRISI se cargaron las imágenes de USUE serie II y serie IV en el módulo MARKOV y se definieron los años transcurridos entre estas series, haciendo la predicción a 4 años para poder compararlo con la carta USUE de la serie V publicada por INEGI en 2011. Como resultado de este análisis se obtiene la matriz de áreas que señala los cambios de superficie que se dieron entre las series.

4.4. Modelado con autómatas celulares

Se construyeron los mapas de aptitud de suelo de acuerdo a las referencias (Akin et al. 2015) es decir, que zonas eran las más aptas para urbanizarse. Estos mapas ayudaron a definir las zonas con mayor probabilidad de urbanización de acuerdo a ciertas características del terreno.

Se corrió el módulo CA_MARKOV en IDRISI usando la matriz de áreas que se obtuvo previamente con Markov y como mapa base el de USUE serie II (1997), proyectando al 2011. Este módulo arroja como resultado una serie de imágenes con la probabilidad de uso de suelo que tendrán los diferentes polígonos en el tiempo estimado.

4.5. Validación de modelo

Para validar los modelos de cadenas de Markov y autómatas celulares, se procesó la imagen obtenida con la categoría de zona urbana para que quedara en código binario y así compararla con la imagen de zona urbana de la serie V y validarla por métodos estadísticos (índice Kappa y Cramer's).

Una vez validada la imagen que se creó por estos métodos, se procedió a elaborar los escenarios de crecimiento urbano a corto (2030) y mediano plazo (2045).

4.6. Modelo con análisis multicriterio

Los mapas de aptitud (factores) se elaboraron de acuerdo a las referencias (Molero et al. 2007; Rosa et al. 2010; Da Silva y Cardozo 2015; Henriquez y Qüense 2010). Se construyó la matriz de peso, es decir colocando un valor de importancia a cada variable de acuerdo a su influencia en el crecimiento urbano, esto con ayuda de expertos en distintas disciplinas.

Dentro del software IDRISI se corrió el módulo MCE, seleccionando la técnica de combinación lineal ponderada. Usando como restricción los polígonos de las ANP (áreas naturales protegidas) y los cuerpos de agua y como factores la altitud, la distancia a los poblados, el tipo de rocas, la distancia a calles y a corrientes intermitentes, ya que estas variables fueron las que tuvieron mayor relación con el crecimiento urbano en el modelo de regresión logística con un valores de ROC mayores a 0.65.

Esta metodología fue utilizada para asignar una aptitud de uso urbano a las diferentes zonas del área de estudio y con ello establecer criterios de urbanización.

5. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Cambios de uso de suelo

En la zona se identificaron 7 tipos de vegetación; bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino-encino, matorral crasicaule y pastizal inducido, así como uso de suelo para agricultura de temporal y zona urbana.

De 1984 a 2011 la zona urbana fue la que ganó más superficie (2,572 ha) y el bosque de encino fue el que perdió más superficie (1,623 ha). La agricultura de temporal fue la que cedió mayor superficie a la zona urbana (1,310 ha), seguida del bosque de oyamel, que cambió a bosque de pino (1,035 ha) y el bosque de encino que cambió a uso urbano (1,054 ha). Además, el bosque de pino cambió a pastizal inducido (598 ha). Igualmente 500 ha que se usaban como pastizal inducido, se urbanizaron.

El cambio de la ocupación de terrenos que se utilizaban para la agricultura por infraestructura urbana puede tener explicaciones edafológicas o por pérdida de fertilidad debido a los usos y costumbres en la siembra que en ocasiones causa contaminación o pérdida de nutrientes en los suelos, lo que conlleva a perder su productividad (García, 2008). Esto coincide con lo reportado por el Instituto de Geografía de la UNAM y el INE (2006) quienes mencionan que en la Delegación Tlalpan de 1995 al 2005, la agricultura de temporal con cultivos anuales siguió una tendencia decreciente: de 8,958 pasó a 8,446 ha.

La pérdida del bosque de encino puede deberse a múltiples factores biofísicos: acidificación de los suelos, erosión, cambio en los patrones de lluvias y temperatura, o incendios, entre otros. Además, pueden existir factores económicos como el aprovechamiento forestal. Sin embargo, en este caso, la mayor superficie que perdió ésta asociación vegetal fue por la transformación a uso urbano (1,050 ha) debido en parte a su cercanía con las zonas ya pobladas.



Figura 1. Pérdidas y ganancias de superficie en hectáreas por categoría en el período de 1984-2011.

5.2. Crecimiento de la zona urbana

De acuerdo a lo reportado en la Serie I, se definió un polígono con superficie de 3,691 ha (11.4%) clasificada como zona urbana, en cambio para la serie V se definieron seis polígonos con una superficie total de 6,263 ha (19%) que significó un aumento de 1.6 veces de la zona urbana. Sin embargo, de acuerdo a la imagen de satélite "Landsat 8" de Diciembre de 2014, la superficie aproximada es de 11,000 ha que representa el 36%. Así mismo de acuerdo al INEGI las AGEB's (áreas geoestadísticas básicas) urbanas en la zona de estudio abarcan una superficie de 10,474 ha (32%). Existe una diferencia de 4,211 ha respecto a lo reportado por la serie V, esto quiere decir que de acuerdo a lo indicado en la serie I, la zona urbana creció 2.8 veces en un período de casi 30 años. De esta manera de 1984 a 2011, hubo un crecimiento de 323 ha por año de la zona urbana (figura 2).

El crecimiento urbano en el DF se ha dado sobre el suelo de conservación de manera difusa, con ocupaciones de baja densidad en todas las laderas de la Sierra de Chichinautzin que se encuentra alledaña a la Sierra del Ajusco (IG, UNAM y INE, 2006).

El desarrollo inmobiliario en la Ciudad de México se ha dado hacia las periferias y no en la zona céntrica, lo cual provocó un aumento en la densidad de la población en los municipios del Estado de México cercanos al DF. Así, para el año 2000, la proporción de la población que vivía en la zona centro del DF disminuyó 48%. Lo anterior conllevó a un aumento en las tasas de crecimiento de los municipios del Estado de México. Si bien la zona de estudio está ubicada mayormente en el DF, esta zona es parte de la periferia de la zona céntrica por lo cual se explica su crecimiento en las últimas décadas (Aguilar, 2002).

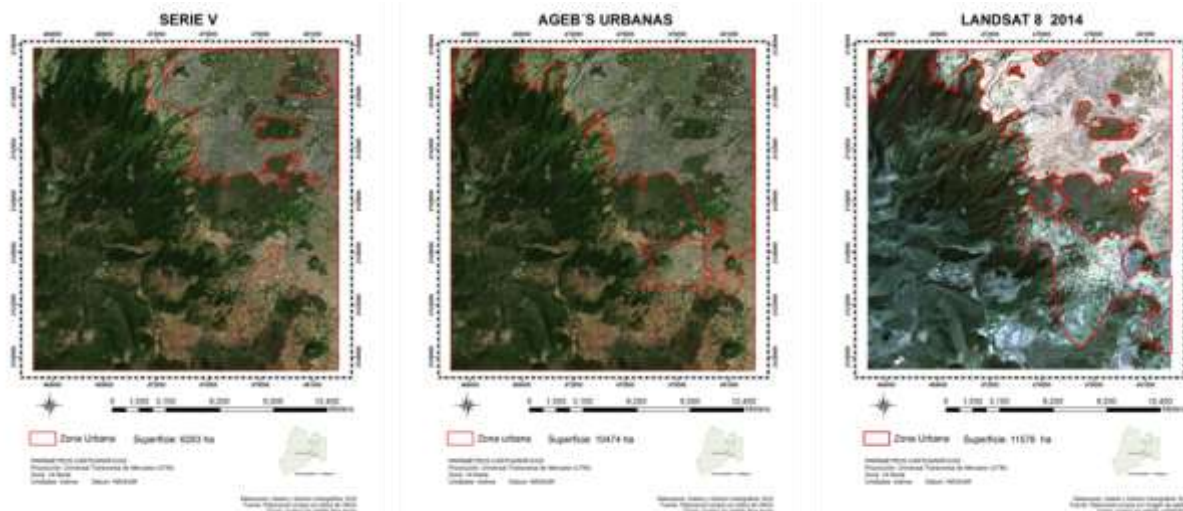


Figura 2. Comparación de la zona urbana con tres distintas fuentes de información. Elaboración propia en base a datos de INEGI, imagen del satélite Landsat 8.

5.3. Modelo de crecimiento urbano y variables que influyeron (regresión logística)

Los escenarios 1 y 3 elaborados por medio de regresión logística, son los que presentaron mayor superficie con probabilidad de ser urbanizada, la cual coincide en cierta medida con las zonas que INEGI reporta con uso de suelo urbano.

De acuerdo a los coeficientes obtenidos para cada variable y sus signos (Tabla 1), se puede decir que en el caso del escenario 1 los sitios más idóneos para el establecimiento de la zona urbana son los de menor altitud, más cercanos a las vialidades, con una orientación hacia el Este, en un tipo de suelo clasificado como urbano y a su vez en zonas con uso de suelo de pastizal y cobertura de suelo con bosque de encino, además en un tipo de roca clasificada como suelo.

De la misma forma, se tiene que para el escenario 3 las zonas más susceptibles a ser urbanizadas son las de menor distancia a zonas urbanas, menor pendiente; de suelos de tipo feozem lúvicos y en superficies con uso de suelo para agricultura de temporal.

	Escenario 1		Escenario 3
Ajuste promedio	93%	Ajuste promedio	93.4%
Índice Kappa	0.49	Índice Kappa	0.51

ROC	0.87	ROC	0.87
VARIABLE	COEFICIENTE	VARIABLE	COEFICIENTE
Altitud	-0.007	Distancia a zonas urbanas	-0.001
Distancia a vialidades	-0.005	Pendiente	-0.156
Orientación	-0.005	Tipo de suelo	9.959
Tipo de suelo	-12.713	Uso para agricultura	3.695
Bosque de encino	20.965		
Pastizal	22.983		
Tipo de roca (suelo)	18.840		

TABLA 1. Bondad de ajuste de dos modelos construidos en base a la ecuación de la regresión logística, así como los coeficientes obtenidos por cada variable- Fuente: Datos obtenidos por medio del programa SPSS.

La pendiente presenta un índice de correlación bajo con la zona urbana, indicando que a menor pendiente, se pueden establecer mejor los centros urbanos, lo cual coincide con Hernández (2015) y Batisani y Yarnal (2009). Además, según el PGOEDF (Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal) la zona urbana actualmente se desarrolla en una pendiente moderada de 0 a 16°. Recordando que el modelo sólo indica la probabilidad de desarrollo de zonas urbanas en dichas áreas, es necesario observar que en la realidad las zonas urbanas se establecen en algunos lugares con pendientes muy pronunciadas con alto riesgo de derrumbe.

Por otro lado, hay una baja correlación entre la distancia a la zona urbana y el crecimiento de la ciudad pero la tendencia es que a menor distancia de los poblados, habrá mayor urbanización. Aguilera (2006) señala que de 1970 a 1984 en la Ciudad de Granada existió un alta correlación entre estas variables. Por el tipo de crecimiento que se está presentando en la zona, la superficie urbana no necesariamente va a crecer a un lado de los grandes núcleos de población. Por otro lado, el PGOEDF instituyó que las áreas que estén a una distancia de 0 a 200 m de los poblados, son las zonas más aptas para urbanizarse.

Además, se obtuvo una fuerte relación entre el uso de suelo de agricultura de temporal y el pastizal y una relación negativa con el bosque de oyamel y de pino. Es decir que de acuerdo a este modelo, hay mayores probabilidades de que se urbanicen los sitios con cobertura de pastizal y agricultura (Batisani y Yarnal 2009; García 2008) que las áreas boscosas. Esta información coincide con el PGOEDF el cual identificó que la ocupación urbana se dio sobre los campos de cultivo y pastizales.

5.4. Simulación del crecimiento urbano a corto y mediano plazo (cadenas de Markov)

El escenario que fue construido por medio de cadenas de Markov con las Series II y IV para pronosticar al 2011, tiene un alto valor de similitud (Kappa 0.98) al comparar con los polígonos de uso urbano de la serie V. Existe una diferencia de 180 ha entre ambas imágenes, puesto que el modelo no toma en cuenta el polígono existente en el sureste de la zona. De acuerdo a este modelo, hubo un cambio de 20.25 ha que estaban clasificadas con un uso diferente al urbano que pasaron a este uso.

Conforme a los cambios cronológicos que han existido en la zona desde los 70 a la fecha, se construyó un escenario que muestra el crecimiento de la superficie urbana en el 2030. No se revelaron cambios aparentes entre la superficie pronosticada para dicho año y la publicada por INEGI para 2011. Lo mismo sucedió con el escenario simulado a 2045. Hay una diferencia de superficie de aproximadamente 550 ha que no consideró el modelo y que en la serie V están contabilizadas como zonas urbanas.

Los escenarios pronosticados para 2030 y 2045 tienen una superficie de área urbana muy parecida a la de la serie V. Esto no quiere decir que no habrá cambios en la superficie urbanizada, lo que sucede es que el crecimiento urbano no sólo está condicionado por los usos de suelo que se han dado históricamente, hay más variables que influyen. Sandoval (2009) señala que las limitaciones del modelo de simulación obtenido por cadenas de Markov se debe a que el modelo determina las probabilidades de cambio con base solamente en el análisis interno del sistema, sin tener en cuenta las variables explicativas y descriptivas, y recomienda usarlo en combinación con otras metodologías. Las cadenas de Markov nos ayudan a dar probabilidades de cambio en el sistema de acuerdo al comportamiento del mismo durante el tiempo, sin embargo, como ya se mencionó, hay n cantidad de variables que pudieran influir positiva o negativamente en el mismo.

5.5. Simulación del crecimiento urbano a corto y mediano plazo de acuerdo a ciertas variables

El modelo en base al método que combina las cadenas de Markov y los autómatas celulares, fue construido con la carta de USUE de la serie II como escenario base, la matriz de transición de áreas entre las serie II y IV y los mapas de aptitud, el pronóstico fue para 14 años. Como filtro, se utilizaron los autómatas celulares estándar de 5 por 5.

El análisis estadístico mostró una alta correlación entre la superficie pronosticada por el modelo y la zona urbana de la serie V (índice Kappa 0.97). La diferencia entre ambas superficies fue de 143 ha (2.3%).

Los escenarios construidos para el 2030 y 2045 fueron muy parecidos y coincidieron en gran medida con la zona urbana de la Serie V (Kappa 0.97) con una diferencia de superficie de 612 ha (figura 3) (9.7%).

Esto no quiere decir que no cambiara la superficie que actualmente se usa como urbana. Más bien quiere decir que no sólo los cambios históricos y las variables de cobertura de suelo, tipo de suelo, tipo de roca y pendiente son las que influyen en el crecimiento de la mancha urbana.

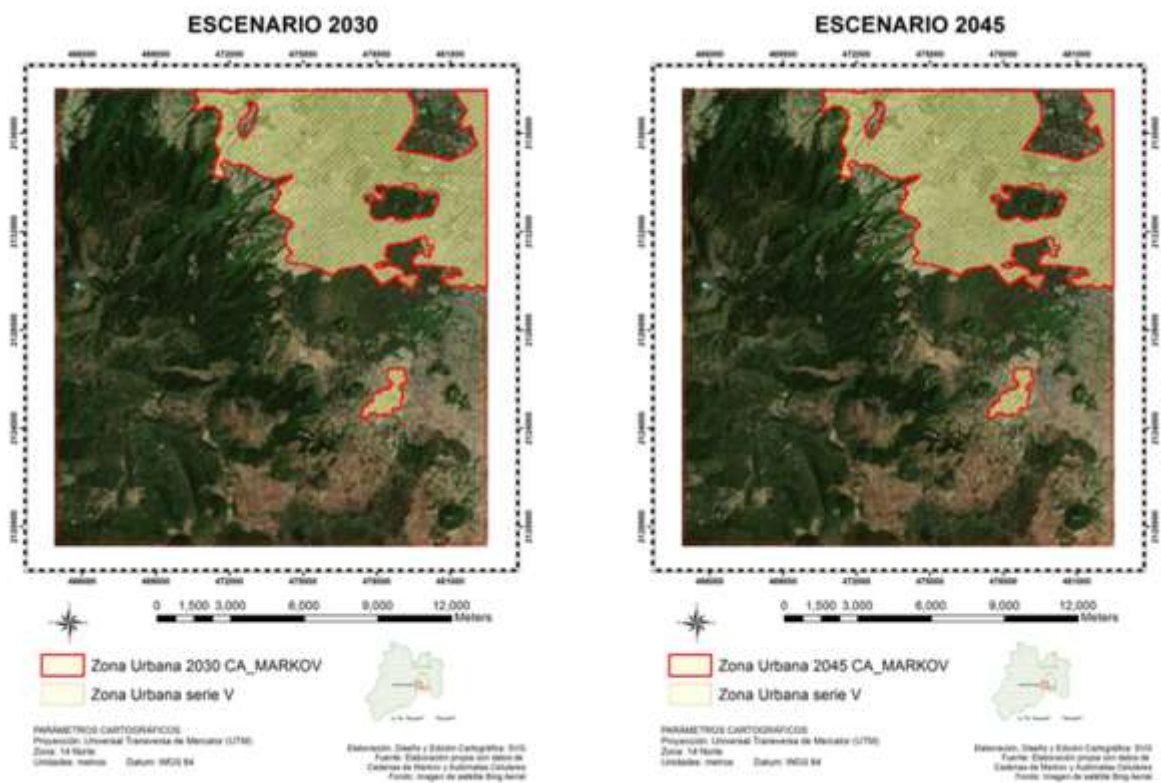


Figura 3. Comparación de escenarios a corto y mediano plazo con la superficie de la zona urbana de la serie V. Elaboración propia con datos de CA_MARKOV.

Si bien las proyecciones hechas por estas metodologías (cadenas de Markov y autómatas celulares) se basaron en algoritmos matemáticos, y el ajuste del modelo fue alto, no pronostican cambio alguno en el crecimiento de la mancha urbana. Como ya se mencionó, la dinámica urbana es muy cambiante, de tal forma que de un momento a otro puede existir un evento ya sea ambiental, social, económico o político que cambie la velocidad y forma de crecimiento de la zona.

5.6. Aptitud de uso de suelo urbano (MCE)

Otro escenario se elaboró por medio de la evaluación multicriterio, utilizando como factores la altitud (peso 0.30), la distancia a zonas urbanas (peso 0.32), vialidades (peso 0.11) y corrientes (peso 0.08), así como el tipo

de rocas (peso 0.17), las cuales fueron las cinco variables con mayor correlación (ROC) en base a la regresión logística. Como limitante se usaron los polígonos de las áreas naturales protegidas y los cuerpos de agua.

Esta puede ser una propuesta que coincide en cierta medida con el PGOEDF, es decir, asignando como zona apta para el crecimiento urbano aquellas zonas donde ya existe infraestructura o equipamiento urbano y en su caso en los poblados rurales que determina este programa. Por otro lado, se asigna la no aptitud urbana en las zonas de conservación y protección y no sólo en las ANP (figura 4).

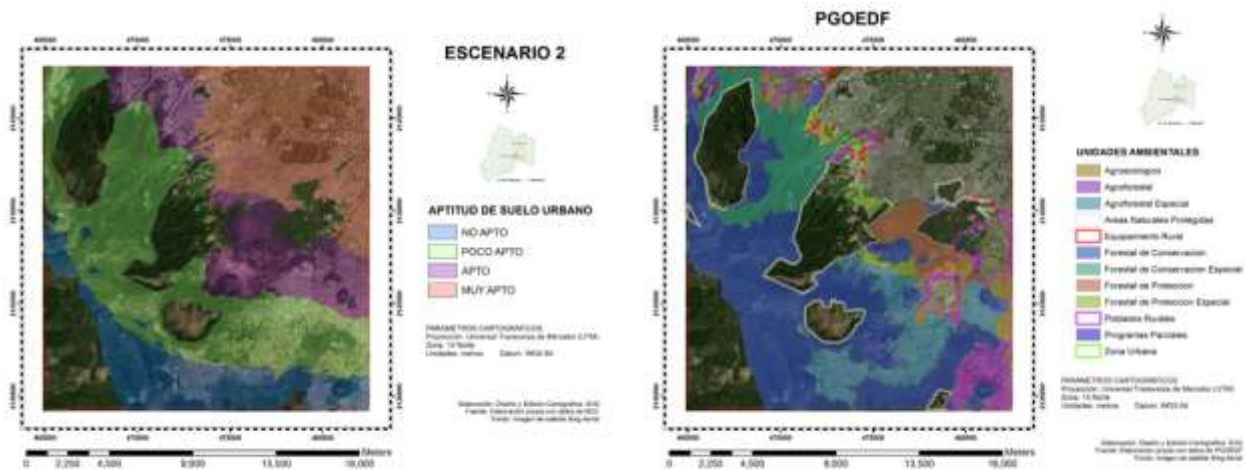


Figura 4. Comparación de mapas de aptitud, en la izquierda se puede ver en tono rojizo y morado las zonas más aptas para urbanizarse y a la derecha enmarcados en rojo y morado las zonas con poblados rurales y equipamiento urbano. Elaboración propia en base a la evaluación multicriterio y el PGOEDF.

Los escenarios aquí presentados no se construyeron para hacer política pública, ya que es necesario contar con un grupo interdisciplinario para definir el problema, plantear los objetivos, buscar y evaluar alternativas y finalmente hacer un análisis de sensibilidad para validar el modelo obtenido (Gómez y Barredo, 2005). En este caso, sólo se realizó el ejercicio para conocer en base a los criterios considerados cuales serían los sitios más aptos para establecer la superficie urbana.

El uso de esta técnica, no garantiza el cumplimiento de la normatividad ambiental de la zona, por lo que se debe tener mucho cuidado al realizar la evaluación de los usos de suelo para cumplir con los objetivos tendientes a la protección ambiental y el desarrollo económico de las grandes urbes.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La zona urbana creció cerca de tres veces en tres décadas, con un crecimiento de 323 ha por año y se estableció sobre 2,971 ha que estaban clasificadas como bosques o uso agrícola o de pastizal.
- Los polígonos que tenían un uso de suelo para agricultura de temporal (1,301 ha) o que eran usados como pastizales (322 ha), perdieron una mayor superficie que fue utilizada como uso urbano, por ser los más cercanos a esta zona.
- El bosque de encino fue el tipo de vegetación que cedió mayor superficie al suelo urbano (1,042 ha).
- Las variables orientación, altitud, pendiente, distancia a corrientes y cuerpos de agua, distancia a la red vial a zona urbana, tipo de suelo, cobertura de suelo son las que tienen mayor influencia en el crecimiento urbano.
- Los escenarios construidos en base a la teoría de cadenas de Markov y autómatas celulares no pronosticaron algún cambio en el crecimiento de la zona urbana, sin embargo, se debe tener en cuenta que hay más variables que pudieran influir en el crecimiento.

- Los escenarios construidos en base a cadenas de Markov y autómatas celulares tuvieron una fuerte correlación con la zona urbana de la serie V (índice Kappa 0.98).
- De acuerdo a la MCE el escenario con los sitios más aptos para el establecimiento de zona urbana son aquellos que tienen menor altitud (2,200 y 2,800 msnm), están sobre roca volcánoclastica que es un material que constituye buenos acuíferos, por lo que la factibilidad para uso urbano es de moderado a bajo porque los afecta, se encuentran más cercanos a infraestructura vial -por lo menos a 100 m-, a asentamientos humanos (200 m) y estén a por lo menos 10 m a cada lado de las corrientes de agua.
- La aptitud de suelo urbano propuesta en el escenario 2, coincide en cierta medida con la superficie asignada como zonas donde existe equipamiento urbano y poblados rurales, según el PGOEDF. Sin embargo, no se pueden hacer comparaciones específicas por que el PGOEDF tiene entre otros objetivos, la clasificación de las distintas zonas para ser urbanizadas, con alguna actividad productiva o de protección.
- Se logró identificar los cambios de uso de suelo y vegetación que se han dado en la zona entre la serie I y la V, lo cual es importante para establecer medidas tendientes a evitar la pérdida de ciertas coberturas de vegetación y evitar el establecimiento de infraestructura urbana en sitios con otra aptitud de suelo.
- El crecimiento urbano pareciera ser algo inevitable dentro de la zona, sin embargo, es importante regularlo y planificarlo de manera sostenible, manteniendo áreas verdes, abiertas arboladas de uso público, dentro de la periferia urbana.
- El que existan o no programas de ordenamiento territorial no garantiza el uso y aprovechamiento del suelo de manera sostenible, no obstante son una buena herramienta que tiene que usarse en la realidad y no sólo en papel.
- Sería bueno realizar el mismo análisis geoespacial de la zona con imágenes satélite de alta resolución o con fotografías aéreas a buena escala.

7. REFERENCIAS

- Aguilar, G. (2002): "Las megaciudades y las periferia expandidas. Ampliando el concepto en Ciudad de México", *EURE*, 28.
- Aguilera B. F. (2006): "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares", *GeoFocus*, 6, 81-112 pp.
- Akın, A., Sunar, F., y Berberoğlu, S. (2015): "Urban change analysis and future growth of Istanbul", *Environmental monitoring and assessment*, 187, 8, 1-15 pp.
- Amuzurrutia-Valenzuela, D.; Aguirre-Salado, C. y Sánchez-Díaz G. (2015): "¿Hacia dónde crece la Ciudad de San Luis Potosí (México) después de 2009?", *EURE*, 41, 124, 113-137 pp.
- Batisani, N. y Yarnal, B. (2009): "Urban expansion in Centre County, Pennsylvania: Spatial dynamics and landscape transformations", *Applied Geography*, 29, 235-249 pp.
- Benítez G., Chacalo A. y Barois I. (1987): "Evaluación comparativa de la pérdida de la cubierta vegetal y cambios en el uso del suelo en el sur de la Ciudad de México", *Aportes a la Ecología Urbana de la Ciudad de México*. Limusa. México.
- Da Silva, C. J., y Cardozo, O. D. (2015): "Evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso del suelo residencial en Resistencia (Argentina)", *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 16, 23-40 pp.
- Decreto. No. 139. Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal (PGOEDF). *Gaceta Oficial del Distrito Federal*. México. Publicado el 1 de agosto de 2000.

- García E. E. (2008). El Proceso de Expansión Urbana y su Impacto en el Uso de Suelo y Vegetación del Municipio de Juárez, Chihuahua. *Tesis de Maestra en Administración Integral del Ambiente*. El Colegio de la Frontera Norte. Tijuana, B. C., México, 63-139 pp.
- Gómez, D. M., y Barredo C. J. (2005). Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación de Territorio. Editorial RA-MA. 2° Edición. España. 43-120 pp.
- Guan, D., Li, H., Inohae, T., Su, W., Nagaie, T., y Hokao, K. (2011): "Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model", *Ecological Modelling*, 222, 20, 3761–3772 pp.
- Hernández R. C. (2015). Dinámica del crecimiento urbano de la zona metropolitana Zacatecas – Guadalupe: cambio de uso de suelo y simulación de escenarios futuros. *Tesis de Maestro en Ciencias en Gestión Ambiental*. Instituto Politécnico Nacional. Durango, Dgo., México, 75-118 pp.
- Henríquez, C., Azócar, G., y Aguayo, M. (2006): "Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile", *Revista de Geografía Norte Grande*, 36, 61-74 pp.
- Henríquez, C., y Qüense, J. (2010): "Evaluación Multiobjetivo aplicada a los usos/coberturas de suelo en la cuenca de Chillán", *Tiempo y Espacio*, 25, 21-39 pp.
- Instituto de Geografía (IG) UNAM, e INE. (2006). *Urbanización periférica y deterioro ambiental en la ciudad de México: el caso de la Delegación Tlalpan en el Distrito Federal*. http://www.inecc.gob.mx/descargas/ord_ecol/proy_urba_tlalpan.pdf, consultado el 15 de Febrero de 2016, México D.F.
- Molero Melgarejo, E., Grindlay Moreno, A. L., y Asensio Rodríguez, J. J. (2007): "Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterio", *GeoFocus*, 7, 120- 147 pp.
- Rosa, V. P., Benavente, F. A., Delgado, M. G., y Sendra, J. B. (2011): "Crecimiento urbano deseable para la aglomeración urbana de Granada en 2020", *En Actas de I Congreso Internacional en Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica* [Recurso electrónico]: Ciudad de Tegucigalpa, Honduras, del 11 al 16 de octubre de 2010 (pp. 578-596). Servicio de Publicaciones.
- Sandoval V. G. (2009). Análisis del Proceso de Cambio de Uso y cobertura de Suelo en la Expansión Urbana del Gran Valparaíso, su Evolución y Escenarios Futuros. *Tesis De Geógrafo*. Universidad de Chile. Santiago de Chile 36-73 pp.
- SEMARNAP y RDS (Red para el Desarrollo Sostenible A. C). (2000) *Áreas Naturales Protegidas de México con Decretos Federales*. <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/130.pdf>, consultado el 1 de febrero de 2016, México D.F.