



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CD. JUAREZ

Instituto de Arquitectura Diseño y Arte

“ANÁLISIS DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE
SUELO DURANTE EL PERIODO 1995 – 2011, EMC Y
AUTÓMATAS CELULARES PARA LA PREDICCIÓN DEL
CRECIMIENTO URBANO, EL CASO DE CIUDAD
CUAUHTÉMOC, CHIHUAHUA”

Proyecto de titulación que presenta:

Jaime Octavio Loya Carrillo

Como requisito parcial para obtener el grado de

Licenciado en Geoinformática

Cd. Cuauhtémoc, Chih.

Mayo 2013

Este proyecto de titulación fue aceptado por el comité revisor designado por la academia del programa de Geoinformática de la Universidad Autónoma de Cd. Juárez, como requisito parcial para optar al grado de Licenciado en Geoinformática



María Elena Torres Olave
Dra. en Ciencia y Tecnología Ambiental
Director del Proyecto de Titulación



Luis Carlos Bravo Peña
Dr. en Ciencias Opción en Desarrollo Regional
Sinodal Titular



Luis Carlos Alatorre Cejudo
Dr. en Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
Sinodal Titular



Lara Cecilia Wiebe Quintana
M.C. en Ingeniería Electrónica
Sinodal Suplente

Mayo 2013

Dedicatoria

A mis padres Bertha y Jaime.

Por su apoyo incondicional, que sin duda me permitió llegar hasta el último momento de mi carrera, de quienes he aprendido a nunca darme por vencido y a confiar en mi mismo y por su constante motivación para vencer el miedo ante diversas situaciones que la vida me ha presentado.

A mis hermanas Gaby, Karen, Yamile y Bethina.

Por el ánimo que me han otorgado para encontrar la felicidad en los momentos más angustiantes, por su apoyo en situaciones difíciles y por consentirme todo el tiempo, han sido sin duda una parte importante de inspiración para lograr concluir esta tesis y mis estudios de licenciatura. ¡Gracias hermanas, las quiero!

A mis sobrinos Aarón, Erick, Ximena, Emiliano, Lupita y Emily.

Por ser la fuente de alegría en el hogar y quienes a pesar de ser tan inquietos, provocan un ambiente familiar que me llena de energía para seguir con mis deberes escolares.

A mis amigos Adrian, Ilse, Romo, Maru, Pina y Ale.

Por acompañarme en las buenas y en las malas, por motivarme y apoyarme cuando más lo necesite, por no dejarme solo estos cuatro años, por enseñarme que el tiempo y la distancia no son motivo de separación.

Agradecimientos

A mis compañeros de clase.

Por que todos fuimos parte del mismo trayecto y juntos superamos retos para llegar hasta donde hoy estamos, en especial a mi equipo de trabajo Claudia, Samuel, Carlos y Tony, por nunca darnos por vencidos y demostrar que con esfuerzo y dedicación las cosas se pueden lograr.

A la Dra. María Elena Torres Olave

Por ayudarme en la elaboración de este documento, por su constante insistencia y enorme paciencia y sobre todo, por soportar a un estudiante inquieto como yo.

Al Dr. Luis Carlos Bravo Peña

Por ser parte de mi formación como estudiante de Licenciatura, de quien he aprendido gran parte de lo que se y por sembrar en mi el sentido de la duda, ayudándome a desarrollar una gran habilidad por la investigación y el estudio independiente.

Al Dr. Rolando Enrique Díaz Caravantes

Por su peculiar sentido del humor y por ser el primero en darme una de las mas grandes oportunidades dentro de la universidad.

Al Dr. Luis Carlos Alatorre Cejudo

Por volvernos inmunes ante su excéntrica forma de ser, pero además por su gran apoyo ante diversas situaciones que se presentaron y por siempre estar al pendiente de nosotros como estudiantes.

Al M.C Hugo Luis Rojas Villalobos

Por meternos en cada lio con sus trabajos, del que sin duda aprendimos una gran cantidad de cosas por cuenta propia, pero sobre todo, por su gran accesibilidad la cuál nos ayudó a salir de una gran cantidad de apuros.

Al M.C Lara Cecilia Wiebe Quintana

Por darnos sus consejos y apoyo moral en momentos de grande tensión, los cuáles nos ayudaron a tomar los problemas de frentes y proponerles solución, cuando parecieran imposibles.

¡A Todos Gracias!

Análisis del cambio de cobertura y uso de suelo durante el periodo 1995 – 2011, EMC y autómatas celulares para la predicción del crecimiento urbano, el caso de ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua

Jaime Octavio Loya Carrillo¹

¹ División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, CP 31579 Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

Resumen: El estudio de la dinámica espacio-temporal del suelo permite conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región específica. Por ello, el objetivo general de este trabajo fue determinar cuáles usos y/o coberturas de suelo serán los más afectados a causa del crecimiento urbano en el año 2019, en la ciudad de Cuauhtémoc, Chihuahua. Se utilizaron técnicas de fotointerpretación y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de tres cartografías con las clases: cultivos agrícolas, suelo urbano o edificado, agua, suelo desnudo, bosque y pastizal, correspondientes a los años 1995, 2003 y 2011. A través del modelo cadenas de Markov se obtuvieron las probabilidades de cambio por clase. Una Evaluación Multi-Criterio (EMC) para todas las clases excepto agua, permitió definir la aptitud del territorio para su crecimiento. Mediante la

integración de los tres subproductos anteriores, se hizo una predicción para el año 2019. El modelo señala que las clases pastizal y suelo desnudo tienen mayor probabilidad de ser afectados por el crecimiento urbano, por otro lado, las tasas de crecimiento real señalan que el uso urbano durante el periodo 1995-2011 aumentó de forma gradual, principalmente a costa del uso agrícola. Los resultados resaltan el uso inadecuado de políticas de planeación, provocando un crecimiento desordenado con fuertes impactos en el ambiente. A partir del trabajo aquí presentado, se pretende sea un instrumento de apoyo en el establecimiento de mecanismo para un desarrollo regional más favorable.

Palabras clave: Crecimiento urbano, SIG, EMC, Autómatas celulares, Cuauhtémoc Chihuahua.

Land use and land cover change from 1995 through 2011, EMC and cellular automata technique for prediction of urban growth in Cuauhtemec, Chihuahua.

Abstract: The study of spatio-temporal dynamics of the soil allows knowing the trends of deforestation, degradation, desertification and loss of biodiversity in a specific region. Therefore, the objective of this work was determined which land cover or land use, will be the most affected because of urban growth in the year 2019, in the city of Cuauhtemec, Chihuahua. Photo interpretation techniques were used and Geographic Information Systems (GIS) for to map the classes: agricultural crops, urban or built, water, bare soil, forest and grassland for the years 1995, 2003 and 2011. Through Markov chain model were obtained the probabilities of change by class. A Multi-Criteria Evaluation (EMC) for all classes except water, allowed defines the suitability of land

for growth. By integrating the three previous products, was simulated by the year 2019. The model indicates that the grassland and bare soil classes are more likely to be affected by urban growth, also, real growth rates indicate that urban use during the period 1995-2011 increased gradually, mainly at the expense of agricultural use. The results highlight the inappropriate use planning policy, causing a uncontrolled urban growth with strong impacts on the environment. The work here presented, intended to be an instrument to support the establishment of regional development mechanisms more favorably.

Key words: Urban growth, SIG, EMC, Cellular Automata, Cuauhtemec Chihuahua.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Según el Informe Mundial sobre la Cultura (1998) de la organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), a principios del siglo XX, 150 millones de personas vivían en zonas urbanas, lo que representaba menos del 10% de la población mundial. Sin embargo para cuando el siglo termina, la población urbana en el mundo se ha multiplicado por veinte, para alcanzar casi los tres mil millones de personas, es decir, que dentro de los núcleos urbanos, se encuentra prácticamente la mitad de la población del planeta (UNESCO, 1998). A pesar de ello, es importante mencionar que aun cuando las expectativas del crecimiento demográfico eran muchas, las tendencias señalan que las tasas de crecimiento poblacional han disminuido, principalmente en una gran cantidad de ciudades existentes en los países en vía de desarrollo (Banco Mundial [BM], 2002).

Cabe mencionar que el desarrollo económico, especialmente en México, es una de las principales razones del crecimiento urbano, ya que como menciona Garza (2002), se convirtió en una nación esencialmente rural en el año 1900 a otra hegemonicamente urbana en el año 2000, de igual forma, Rionda (2007, 2008), señala que el esquema económico, las reformas institucionales y las bases estructurales del desarrollo, son factores que explican claramente los patrones de urbanización.

Los procesos de crecimiento urbano se presentan en el espacio-tiempo, sobre los diferentes usos y coberturas de suelo existentes al área circundante, lo cual, propicia transformaciones radicales al entorno, ocasionando impactos agresivos al medio ambiente derivándose una gran cantidad de problemas ambientales, que en ocasiones, resultan impredecibles (Alberto, 2009). La

importancia de este fenómeno, se debe principalmente a la degradación que se provoca en los ecosistemas naturales originales, causados específicamente por la presencia de ciudades, las cuales son el resultado del crecimiento urbano y según varios especialistas en el tema (Alberto, 2009), son consideradas como ecosistemas artificiales, a veces calificadas como parásitos, debido a que toman energía y recursos de ecosistemas vecinos.

Es claro como la expansión urbana ha ocurrido a lo largo del tiempo a partir de procesos de cambio de cobertura y uso de suelo, en el que se transforman espacios naturales o seminaturales en espacios de ocupación urbana (Sandoval, 2009), de tal forma, que este fenómeno ha adquirido gran importancia durante los últimos años, debido, a la gran velocidad con la que se comprometen grandes extensiones de terreno, las cuales estuvieron cubiertas inicialmente por diversos usos agrícolas y extensas masas forestales (Romero et al, 2007), por lo que muy seguramente, este proceso seguirá ocurriendo de la misma forma en los siguientes lapsos de tiempo.

En este sentido, el estudio de la dinámica espacio-temporal del cambio de uso y cobertura de suelo permite asentar las bases para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región específica (Velázquez et al, 2002). De acuerdo con esto, en México, existen una gran cantidad de estudios realizados (Bocco, 2001; Priego et al, 2004; Berlanga et al, 2009), sin embargo, ya no es suficiente establecer el grado de conversión de usos y coberturas de suelo en una zona determinada, sino que es necesario aprovechar la tecnología, como lo es el caso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Sistemas de Percepción Remota (SPR), con el objetivo de prevenir, anticipar y mitigar dinámicas insostenibles provocadas

principalmente por las formas actuales de crecimiento urbano (Sandoval, 2009).

Los SIG son definidos por Goodchild (2000) como: “*una tecnología integradora que une varias disciplinas con el objetivo común del análisis, creación, adquisición, almacenamiento, edición, transformación, visualización, distribución, etc. de información geográfica*”, mientras que los SPR permiten generar datos actualizados sobre terrenos específicos, apoyados con levantamientos y verificaciones en campo (Rosete y Bocco, 2004), ambas herramientas se complementan muy bien, de hecho, existen varios estudios que utilizan estos instrumentos como apoyo (Berlanga y Ruiz, 2007; Leutner et al, 2012) y gran parte de ellos, tratan de modelar diversos datos espaciales para descubrir patrones de crecimiento y cambio, sobre todo, para dar soporte a decisiones que tienen que ver con diversos proyectos cuyo objetivo, es la conservación ambiental.

A partir del escenario planteado con anterioridad, surge la necesidad de utilizar modelos de simulación de cambio de cobertura y uso de suelo, los cuales, básicamente tienen el objetivo de explorar los mecanismos, las variables sociales, económicas y espaciales que provocan este fenómeno, además, permiten proyectar los efectos potenciales en el ámbito socio-ambiental, así como la evaluación del impacto que políticas y regímenes alternativos tienen, en los patrones de crecimiento urbano y uso de suelo (Henríquez et al, 2006).

Definición del problema

Los cambios económicos, sociales y la urbanización de un territorio, en la mayoría de las ocasiones están ligados al desarrollo industrial, lo que trae consigo un acelerado incremento en la población urbana y a su vez, un aumento considerable en la extensión de su superficie, en consecuencia, surgen nuevos fenómenos sociales, entre los que destacan la migración del campo a la ciudad y la necesidad

de desarrollar sistemas de transporte mucho más complejos (Rojas et al, 2009). Estos factores han hecho que la ciudad se transforme en un espacio dinámico y en continuo crecimiento, donde la demanda de recursos es cada vez mayor. En este contexto, aparecen una gran cantidad de ciudades existentes en México, como lo es el caso de ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua, la cual es catalogada como un complejo agrícola y comercial, en el que la decadencia del sistema de haciendas y el pensamiento que surgía de la nueva forma de tenencia de la tierra, pretendía además del desarrollo de la agricultura y la ganadería, la creación de nuevos centros urbanos (González y Terrazas et al, 2011).

El municipio de Cuauhtémoc, de acuerdo con las cifras correspondientes al censo de población y vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI [INEGI], 2011), la población en el año de 1990 era de 112,589 habitantes, mientras para el año 2010 la cifra aumentó a 154,639 habitantes, es decir se incrementó un 37.34% en un periodo de 20 años. Esto es señal de que la demanda de recursos es cada vez mayor y a pesar de no ser una ciudad con una gran extensión territorial, es bueno comenzar con estrategias de planeación que impidan el crecimiento desordenado de la ciudad.

Partiendo de lo anterior, en el presente estudio se busca definir la dinámica de cambios de uso y cobertura de suelo en el contexto espacial y temporal, para de ser necesario, proponer a las autoridades encargadas de la planeación del municipio, la información necesaria para dar soporte a decisiones que busquen reducir los impactos del crecimiento urbano sobre los usos actuales (agrícolas) y la vegetación.

Justificación

La expansión urbana tiene diversos efectos sobre la superficie terrestre por ejemplo la pérdida del suelo con un gran valor productivo,

aumenta la presión en ambientes con un alto interés ecológico, fragmenta y satura el paisaje, provoca el uso intensivo de recursos naturales acabando con una porción bastante significativa de los mismos, y de esta forma, esta lista podría continuar hasta volverse casi interminable, por ello es necesario desarrollar modelos que permitan evaluar las consecuencias de las acciones del pasado y a la vez, permitan predecir las tendencias del futuro basados en las características del presente. En este sentido, es necesario prestar especial atención a los escenarios futuros, con el propósito de establecer estrategias mejor fundamentadas que permitan el desarrollo urbano con el mayor respeto posible hacia el entorno y que a su vez, ayuden a comprender mejor este fenómeno como el sistema dinámico complejo que es.

Cabe resaltar que el diagnóstico, la prospectiva y la modelización espacial del crecimiento urbano, también permite esclarecer el deterioro del entorno agrícola, lo cual lo vuelve en un tema de gran relevancia, principalmente, por ser un factor que garantiza la funcionalidad ambiental y la producción de alimentos. Por tal motivo, la información generada a partir del modelado de datos espaciales, permite a los administradores de suelo y tomadores de decisiones predecir los efectos del manejo sobre las funciones del suelo, para de esta forma, comparar alternativas y tomar las decisiones apropiadas, lo que de alguna manera garantiza la fertilidad del suelo para futuras generaciones.

El crecimiento urbano, se consolida principalmente en lugares preferentes por la población, de acuerdo a ello, aparece una técnica conocida como Evaluación MultiCriterio (EMC), la cual tiene el propósito de apoyar la toma de decisiones, en este caso, la decisión del lugar más apto para construir. Esta técnica, puede ser integrada dentro de un SIG, por lo que suele ser muy útil en cuanto a

procesos de modelación de datos espaciales para el ordenamiento del territorio.

La modelación de escenarios urbanos futuros permite orientar como, donde y cuanto crecerán. En este sentido, se vuelve una herramienta muy importante sobre todo en términos de ordenamiento y planeación del territorio, en lo que a esto respecta, es de suma importancia para evitar los grandes problemas del crecimiento desordenado. De tal forma que esto, obliga a replantear las herramientas de planeación urbana, con el propósito de analizar los pros y contras, y de ser necesario modificar el manejo de la ciudad.

Lo innovador de este trabajo, reside en la importancia de generar información que ayude al establecimiento de políticas de planeación urbana, mediante el uso de modelos de simulación de cambio de usos y cobertura del suelo, integrando para ello, técnicas de sensoria remota y sistemas de información geográfica, especialmente en el caso de México, un país en vía de desarrollo, en el que es necesario la aplicación de modelos predictivos de crecimiento urbano, con el propósito de evitar los efectos secundarios que esto ocasiona. Además, hay que tomar en cuenta que este tipo de estudios en el país son muy escasos Rosete et al (2008) y Thaden (2012), de modo que la necesidad de generar este tipo de análisis es cada vez mayor, sobre todo aquellos en los que se especifique la metodología lo más claro posible, para que en un futuro puedan ser replicados en distintas zonas urbanas.

OBJETIVOS

Objetivo General

Generar un modelo integrado a partir del análisis del proceso de cambio de uso y cobertura de suelo en el periodo 1995-2011, además de la modelación del escenario futuro de crecimiento urbano para el año 2019.

Objetivos específicos

- Determinar la dinámica espacio-temporal de los patrones de cambio de cobertura y uso de suelo en el periodo 1995-2011.
- Modelar los procesos y patrones de cambio de cobertura y uso de suelo para el año 2019.
- Determinar en base al modelo de predicción cuales usos y coberturas de suelo serán los más afectados a causa del crecimiento urbano.

Hipótesis

“La proyección de escenarios futuros permite definir cuales usos o coberturas de suelo serán los más afectados a causa del crecimiento urbano de acuerdo al modelo de predicción.”

ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Cuauhtémoc y colonia Anáhuac, forman un corredor que permite el flujo de servicios de una comunidad a otra. Estas dos comunidades se encuentran contenidas en el municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua, México, en la región centro-oeste del estado, en una zona de transición entre la meseta y la sierra con altitudes que varían desde los 1800 a los 2400 metros de altura. Limita al norte con el municipio de Namiquipa, al sur con Cusihiuriachi y Gran Morelos, al este con Bachiniva y Guerrero y al oeste con Riva Palacio. Se encuentra delimitada por las coordenadas geográficas extremas 28° 19' 39" y 28°30' 15.9" de latitud norte y los 106°40' 40.8" y 106° 56' 33.1" de longitud oeste (Figura 1).

MATERIALES Y MÉTODOS

Cambio de uso y cobertura de suelo

Utilizando técnicas de fotointerpretación se realizaron tres cartografías de uso y cobertura de suelo correspondientes a los años 1995, 2003 y 2011, mediante el uso de imágenes del

sensor Landsat TM pertenecientes a los meses de octubre para el primer año y noviembre para los siguientes dos, las cuales tienen una resolución espacial de 30 x 30 metros, además como herramienta auxiliar, se utilizaron imágenes en verdadero color contenidas en el software SIG Google Earth, esto con el fin de facilitar el proceso de fotointerpretación.

El manejo de imágenes satelitales fue a través de software SIG ArcGis 9.3, en el cuál, las clases fueron definidas de acuerdo al sistema de clasificación del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) resumido por Lillesand et al (2008). De acuerdo a esto, se establecieron las siguientes clases: suelo urbano o edificado, cultivos agrícolas (incluye cultivos de secano de regadío y huertas de manzana), pastizales, bosques, agua y suelo desnudo (ver Cuadro 1).

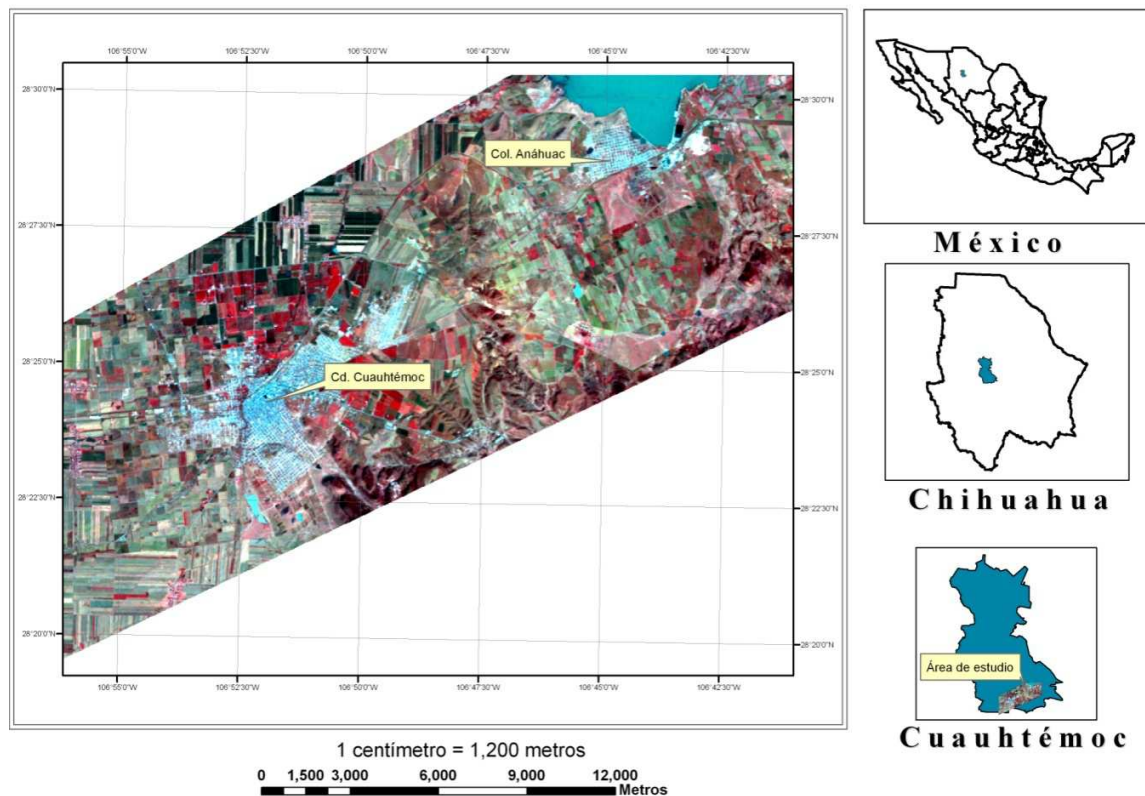

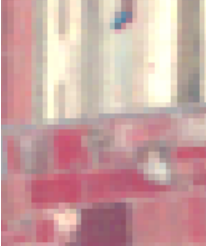


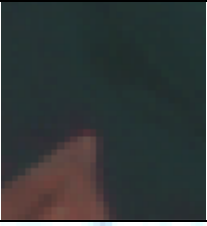



Figura 1. Localización del área de estudio, imagen Landsat TM falso color infrarrojo (RGB: 432).

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 1. Tipología utilizada para la caracterización de usos y coberturas de suelo mediante fotointerpretación.

USO O COBERTURA DE SUELO	DESCRIPCIÓN	VISTA
Suelo urbano o edificado	Se compone de áreas cubiertas en gran parte por estructuras. Se incluyen ciudades, pueblos, aldeas, grandes extensiones a lo largo de vías de comunicación, complejos industriales y comerciales, instituciones que en su caso deban ser aisladas de la zona urbana.	
Cultivos agrícolas	Puede ser definida como la tierra utilizada principalmente para la producción de alimentos y fibras. Incluye: tierras de cultivo, pastos, huertos, viñedos, viveros ornamentales, hortícolas, áreas confinadas y operaciones de alimentación.	

USO O COBERTURA DE SUELO	DESCRIPCIÓN	VISTA
Pastizales	Se definen como el terreno donde la vegetación natural potencial es predominante por gramíneas, plantas análogas, especies herbáceas o arbustos, así como pastos naturales.	
Bosques	Representan las áreas que tienen un densidad aérea del 10 por ciento o más, zonas capaces de producir madera u otros productos de la misma. Zonas que ejercen una influencia sobre el régimen climático o el agua.	
Agua	Esta clase incluye arroyos, canales, lagos, lagunas, embalses, bahías y estuarios.	
Suelo desnudo	Clasificada como la tierra árida con capacidad limitada para sustentar la vida y en la que menos de una tercera parte del área tiene vegetación u otra cubierta. Se incluyen áreas como: salinas secas, baches, rocas al descubierto, minas a cielo abierto, canteras y graveras.	

Fuente:Elaboración propia a partir de Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2008). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.

Evaluación MultiCriterio (EMC)

La técnica de EMC se llevó a cabo en el software de procesamiento de imágenes Idrisi Taiga, a través del módulo Decision Wizard, para lo cual son requeridas una serie de capas, es decir, los factores, imágenes de aptitud con valores de 0 a 255 donde 0 es nula aptitud y 255 máxima aptitud. Mientras que las limitantes son capas binarias de 0 y 1, donde 0 restringe el cambio y 1 lo permite.

Los factores considerados para la EMC fueron:

- Red vial principal: a este factor se le calculó la distancia mediante el módulo DISTANCE en Idrisi y se utilizó para obtener el mapa de aptitud para crecimiento urbano, dado que como señalan Henríquez y Azócar (2007); “*las vías de comunicación actúan como el principal eje estructurante del crecimiento urbano*”.
- Pendientes: para crecimiento urbano, de acuerdo con La Dirección de Estudios del

Territorio Nacional (DETENAL) señalado por Durán (2004), considera pendientes adecuadas entre 0 y 15%, donde de 0 a 5% es totalmente apta, entre 5 y 15% moderadamente, y superiores al 15% es de uso urbano limitado.

- Ganancias de superficie para cada uso de suelo

Las limitantes consideradas para la EMC fueron:

- Áreas naturales protegidas
- Red hidrográfica

Cabe señalar que todos los factores utilizados para la obtención de los mapas de aptitud fueron estandarizados, es decir se

generaron a partir de una función lineal en una escala de 0 a 255 mediante el módulo FUZZY de Idrisi, a excepción de la red vial principal, la cuál fue de modo decreciente, ya que como se señaló anteriormente, mientras mas cercanas estén las vías al área urbana mayor aptitud tendrán.

Posteriormente se definió el peso para cada uno de los factores en la EMC, para ello, se utilizó el método de Jerarquías Analíticas (Gómez y Barredo, 2006) programado en el módulo Weight de Idrisi, en el cuál se asigna un valor a cada factor de acuerdo a su nivel de importancia (Figura 2). Al final, este procedimiento permitió obtener un mapa de aptitud territorial mediante la suma lineal ponderada de cada uno de los factores y limitantes, generados durante el análisis.

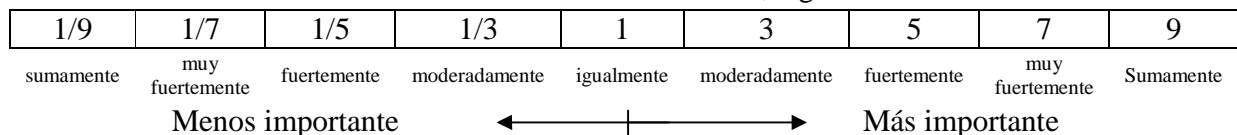


Figura 2. Escala de posición continúa

NotaFuente: Eastman, Ronald J. *IDRISI Kilimanjaro Guide to GIS and Image Processing*.USA: IdrisiProduction, 2003.

Modelo de simulación de cambio (Autómatas Celulares)

El modelo de simulación que se aplicó en el área de estudio fue un método con base en autómatas celulares, que se encuentra dentro del software Idrisi Taiga, en el módulo Ca_Markov. Para ello, es necesario la integración de una imagen base, es decir una cartografía de usos y cobertura de suelo, en este caso la correspondiente al año 2011. Además, se deben incorporar las cadenas de Markov que contienen las probabilidades de cambio de un uso o cobertura de suelo en función del estado anterior de los mismos, es decir, con las cartografías pertenecientes al año 1995 y 2003, se obtuvieron las probabilidades de cambio para el año 2011. Por último, fueron requeridas las imágenes de aptitud generadas

en la EMC, dado que el modelo Ca_Markov predice de acuerdo a las probabilidades generadas mediante el método de cadenas de Markov, pero limitándose a las zonas de mayor aptitud obtenidas a partir de la EMC.

Una vez modelada la predicción de cambios de uso y cobertura de suelo, se validó a través de la comparación del año simulado con el año observado, es decir, el producto de aplicar Ca_Markov fue comparado contra la cartografía del año 2011. Para ello, se utilizó un índice estadístico llamado Kappa Estándar, el proporciona una perspectiva preliminar, con carácter matemático y fácil de interpretar (Barreira et al, 2012). Este índice utiliza a la vez Klocation y Kquantity. El primero de estos índices, mide el error de localización, es decir

la ubicación de una categoría en un mapa es diferente de la ubicación de la misma categoría en otro mapa. Mientras que Kquantity, cuantifica el error que se produce cuando la cantidad de celdas pertenecientes a una categoría en un mapa es diferente a la cantidad de celdas de dicha categoría en otro mapa (Pontius, 2000; Sousa et al, 2002).

RESULTADOS

Cambio de uso y cobertura de suelo

Se generaron tres cartografías de usos y coberturas de suelo correspondientes a los años 1995, 2003 y 2011 (Figuras 3, 4 y 5, respectivamente), con las cuales se cuantificaron los cambios en las diferentes coberturas existentes en el área de estudio. Mediante ellas se obtuvieron las matrices de detección de cambio en los periodos 1995-2003 (Cuadro 2) y 2003-2011 (Cuadro 3), así como las matrices de probabilidad de cambio para las fechas señaladas con anterioridad (Cuadro 4 y 5). Es importante señalar que en estos productos, se pudo discriminar que clases de usos y/o coberturas de uso de suelo, son los que presentaron cambios más notorios.

Durante el periodo 1995-2003 (Cuadro 2), la clase que sufre un cambio más significativo son los cuerpos de agua, dado que paso de 522.36 hectáreas (ha) a 93.78 ha, lo que equivale a un -82.54% de la superficie original. La clase pastizal también sufrió un cambio notable, dado que 224.64 ha pasaron a ser parte del uso agrícola. Para el periodo 2003-2011 la clase agua, pierde nuevamente una superficie significativa en cuanto a su representatividad en el área de estudio y a su ubicación espacial original, dado que 18.72 ha se convirtieron en suelo desnudo y 12.15 ha en pastizales, sin embargo, esta misma cobertura en el año 2003 era de 93.78 ha, y en el año 2011 se incrementó a 103.32 ha, donde 40.41 ha de suelo desnudo se convirtieron en algún cuerpo de agua, un fenómeno que se nota claramente

en la aparición de una serie de represas pequeñas, distribuidas a lo largo de la superficie en estudio.

Cabe señalar que uno de los cambios de uso de suelo más importantes, es el crecimiento de la mancha urbana en ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua y colonia Anáhuac, dado que en un lapso de dieciséis años, durante el periodo de 1995 a 2011, pasó de 3692.79 ha a 4464.9 ha, es decir, se incrementó 772.11 ha lo que equivale a un 20.9% de la superficie original. Este incremento se presenta de forma gradual, tal y como se muestra en la Figura 2 y principalmente, sobre el uso de suelo agrícola (Cuadro 2 y 3).

Cabe señalar que las zonas de crecimiento urbano son cada vez más alejadas del centro de la ciudad, lo cual demanda mayor cantidad de servicios y por tanto más explotación de recursos naturales, en este sentido habría que prestar especial atención al tipo de crecimiento que se está presentando en la región, específicamente el corredor Cuauhtémoc-Anáhuac y la parte sur-este de la ciudad, donde se observa claramente dicho crecimiento.

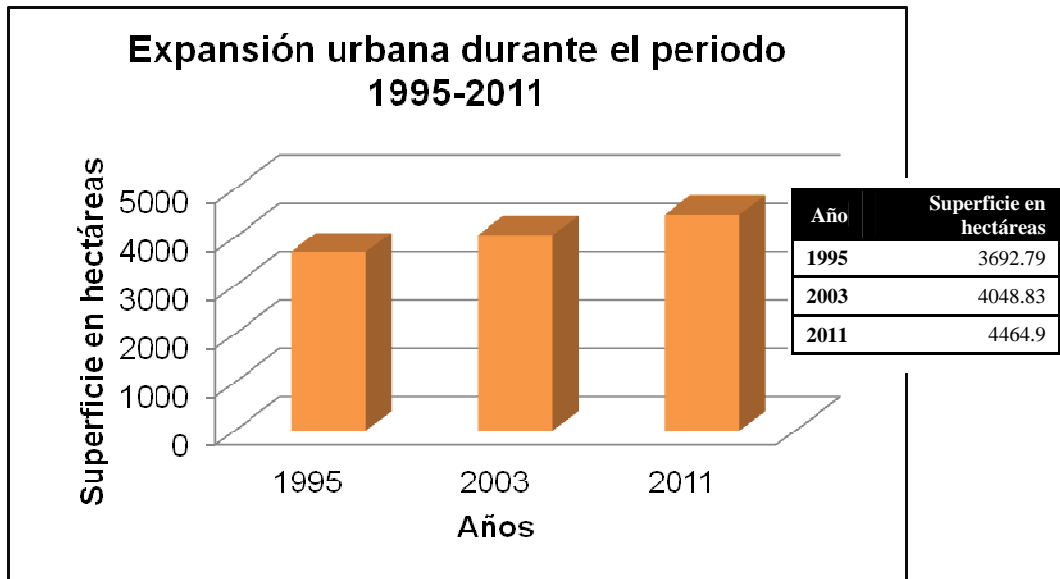


Figura 2. Tendencias del crecimiento urbano durante el periodo 1995-2011.
Fuente: Elaboración propia

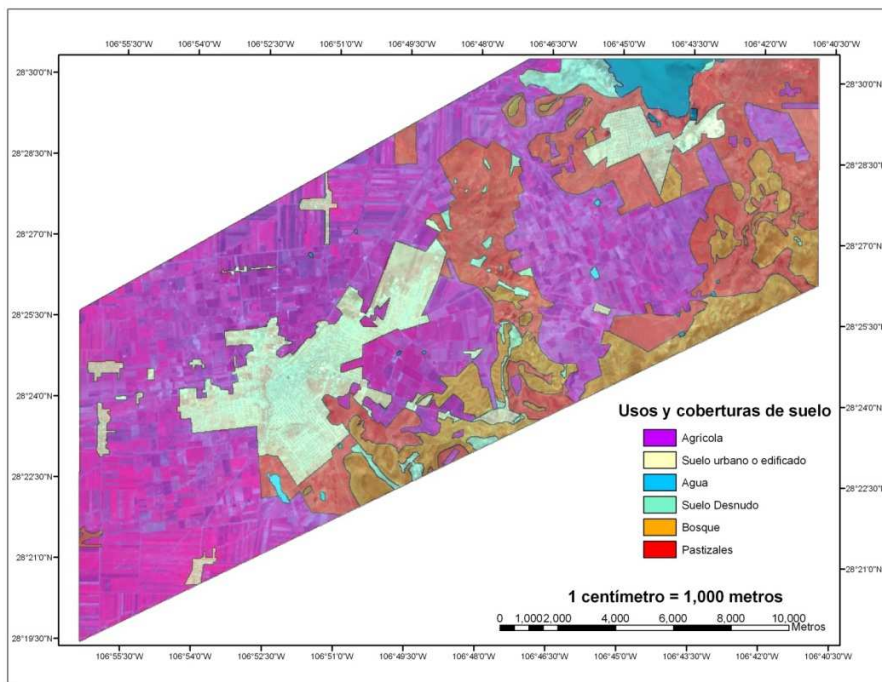


Figura 3. Cartografía de usos y cobertura de suelo para el año 1995
Fuente: Elaboración propia

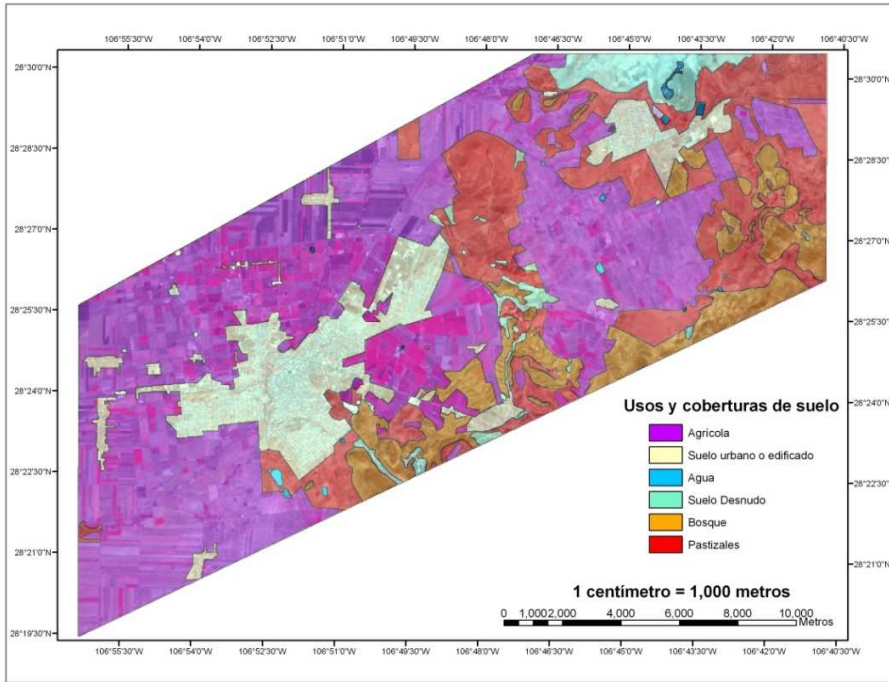


Figura 4. Cartografía de usos y cobertura de suelo para el año 2003

Fuente: Elaboración propia

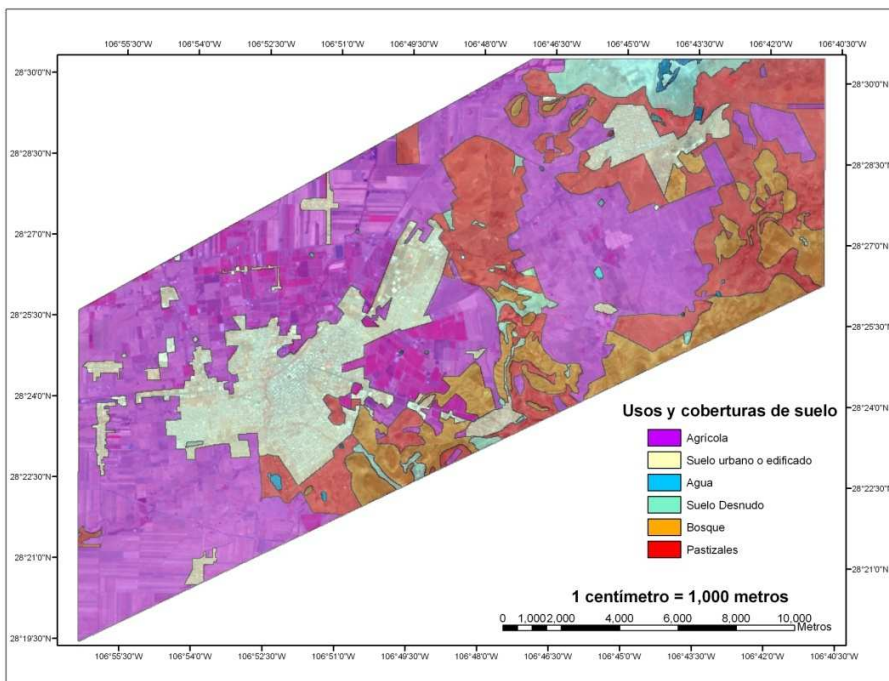


Figura 5. Cartografía de usos y cobertura de suelo para el año 2011

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 2. Matriz de detección de cambios de usos y coberturas de suelo para la ciudad de Cuauhtémoc, Chihuahua durante el periodo 1995-2003.

	Pastizales	Urbano o edificado	Agua	Bosque	Agrícola	Suelo desnudo	Cobertura total año 2 (2003)
Pastizales	5402.25	69.48	5.76	105.66	224.64	135.9	5943.69
Urbano o edificado	0	3692.79	0	0	0	0	3692.79
Agua	3.87	0	86.58	0	0	431.91	522.36
Bosque	49.14	61.92	0	2587.41	18.18	6.84	2723.49
Agrícola	88.74	223.29	1.44	32.49	15008.49	3.33	15357.78
Suelo desnudo	94.95	2.79	0	1.44	2.07	466.74	567.99
Cobertura total año 1 (1995)	5638.95	4050.27	93.78	2727	15253.38	1044.72	28808.1

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3. Matriz de detección de cambios de usos y coberturas de suelo para la ciudad de Cuauhtémoc, Chihuahua durante el periodo 2003-2011.

	Pastizales	Urbano o edificado	Agua	Bosque	Agrícola	Suelo desnudo	Cobertura total año 2 (2011)
Pastizales	5619.42	11.7	0	0	8.91	0.18	5640.21
Urbano o edificado	0	4048.83	0	0	0	0	4048.83
Agua	12.15	0	62.91	0	0	18.72	93.78
Bosque	0	6.21	0	2720.79	0	0	2727
Agrícola	0	398.16	0	0	14847.66	7.74	15253.56
Suelo desnudo	4.77	0	40.41	0	0	999.54	1044.72
Cobertura total año 1 (2003)	5636.34	4464.9	103.32	2720.79	14856.57	1026.18	28808.1

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4. Matriz de probabilidad de cambio por clase para el periodo 1995-2003.

	Pastizales	Urbano o edificado	Agua	Bosque	Agrícola	Suelo desnudo	Sumatoria
Pastizales	0.909	0.012	0.001	0.018	0.038	0.023	1
Urbano o edificado	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1
Agua	0.007	0.000	0.166	0.000	0.000	0.827	1
Bosque	0.018	0.023	0.000	0.950	0.007	0.003	1
Agrícola	0.006	0.015	0.000	0.002	0.977	0.000	1
Suelo desnudo	0.167	0.005	0.000	0.003	0.004	0.822	1

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5. Matriz de probabilidad de cambio para el periodo 2003-2011.

	Pastizales	Urbano o edificado	Agua	Bosque	Agrícola	Suelo desnudo	Sumatoria
Pastizales	0.996	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	1
Urbano o edificado	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1
Agua	0.130	0.000	0.671	0.000	0.000	0.200	1
Bosque	0.000	0.002	0.000	0.998	0.000	0.000	1
Agrícola	0.000	0.026	0.000	0.000	0.973	0.001	1
Suelo desnudo	0.005	0.000	0.039	0.000	0.000	0.957	1

Fuente: Elaboración propia

Modelo de predicción de uso y coberturas de suelo

Cartografías de uso de suelo. Para la aplicación del modelo de predicción de usos y coberturas de suelo, se elaboraron tres cartografías de usos y coberturas de suelo (Figuras 3, 4 y 5), en las que se definieron las clases: agrícola, suelo urbano o edificado, pastizal, bosque, agua y suelo desnudo.

Cadenas de Markov. Se generaron diagramas de Markov, mediante las matrices de detección y probabilidad de cambio, en las cuales, se señalan cada uno de los cambios existentes por clase, en los periodos 1995-2003 y 2003-2011 (ver anexos 2 y 3).

Mapas de aptitud. A partir de una EMC, se obtuvieron cinco mapas de aptitud correspondientes a las clases de usos y coberturas de suelo: agrícola, suelo urbano o edificado, pastizal, bosque y suelo desnudo. En estos mapas, se resalta la aptitud del territorio para un uso o cobertura específica, a través de una escala graduada de 0 a 255, donde 0 indica nula aptitud y 255 la máxima (ver anexos 4 a8).

Modelo predictivo. El modelo predictivo de usos y coberturas de suelo basado en la técnica de autómatas celulares, se generó mediante el módulo CA_MARKOV de Idrisi, el cual no muestra cambios significativos para las diferentes clases manejadas. Aun así, de acuerdo con esto, en primer lugar se modeló hacia el año 2011 (Figura 6) y se procedió con la validación a través del comando validate, obteniendo de esta forma los resultados del índice de concordancia Kappa, el cual, depende directamente de Kquantity y Klocation. Por lo anterior y basados en el Cuadro 6, se aceptó el modelo de predicción para el año 2011, dado que el valor de Kappa obtenido en este modelo fue de 0.98. Por lo tanto, partiendo del supuesto que las probabilidades de cambio permanecen constantes, se aplicó el mismo modelo para el año 2019, obteniendo entonces, otra cartografía de usos y coberturas de suelo con las superficies esperadas para ese año (Figura 7).

Cuadro 6. Fuerza de concordancia entre mapas categóricos de acuerdo a los valores de Kappa.

Valores de Kappa	Nivel de concordancia
< 0.00	Pobre
0.00 - 0.20	Leve
0.21 - 0.40	Razonable
0.41 - 0.60	Moderado
0.61 - 0.80	Considerable
0.81 - 1.00	Casi perfecto

Nota Fuente: Sousa, S, S Caeiro, y M Painho. «Assessment of map similarity of categorical maps using kappa statistics, the case of Sado Estuary.» Proceedings of ESIG, 2002: 1-6.

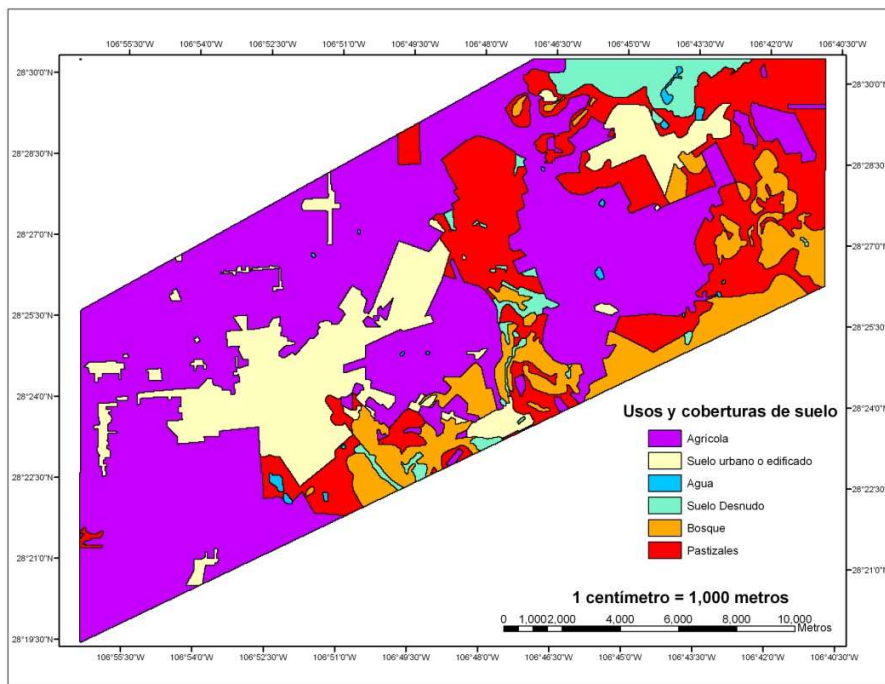


Figura 6. Resultado del modelo de predicción de usos y coberturas de suelo para el año 2011.

Fuente: Elaboración propia

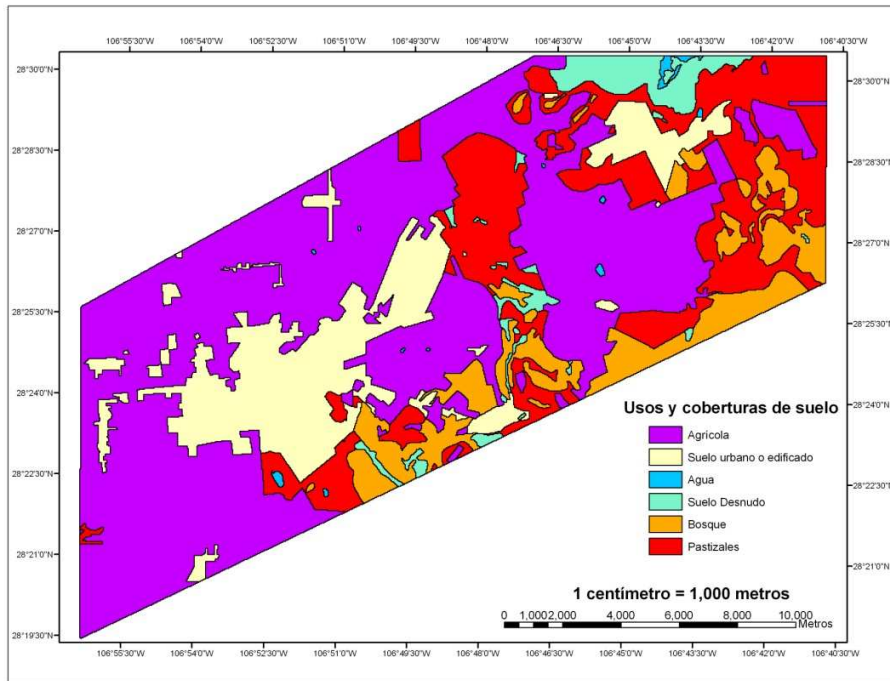


Figura 7. Resultado del modelo de predicción de usos y coberturas de suelo para el año 2019.
Fuente: Elaboración propia

Usos de suelo susceptibles a cambio para el año 2019. Una vez obtenido el modelo de predicción de usos y coberturas de suelo para año 2019, se realizó una tabulación cruzada (Cuadro 7) para determinar las clases y superficie que pudieran cambiar. En este sentido, se observa que los pastizales pudieran cambiar 11.52 ha para uso urbano, así como 7.74 ha de suelo desnudo. El modelo de predicción señala que 13.68 ha pertenecientes a los cuerpos de agua, pudieran convertirse a pastizales, sin embargo, es difícil atribuirse este cambio a causas antropogénicas, dado que en los últimos años la región ha sido azotada por fuertes periodos de sequía, por otro lado, para el resto de los usos de suelo, el modelo no presenta ningún cambio.

DISCUSIÓN

El uso de técnicas de fotointerpretación en imágenes digitales, en conjunto con el uso de

SIG, pueden llegar a ser un instrumento de gran utilidad, es el caso con cambios de uso y cobertura de suelo en un área específica, como se presenta en este trabajo. Ante esto, autores como Berlanga y Ruiz (2007), Aguilar et al, (2010), han utilizado técnicas obteniendo resultados satisfactorios como una metodología viable para evaluar el crecimiento urbano de las ciudades (Romero y López, 2000), coincidiendo con los resultados de este trabajo.

El crecimiento urbano de la ciudad de Cuauhtémoc, Chihuahua y colonia Anáhuac, se ha presentado mayormente a costa del uso de suelo agrícola, un fenómeno que no ha sido abordado del todo y además, considerado como una de las variables que fragmenta los ecosistemas, y que en algunos casos puede incidir sobre la capacidad de abastecimiento de servicios para la población humana (Martínez y Monroy, 2009).

Cuadro 7. Matriz de detección de posibles cambios de usos y coberturas de suelo para la ciudad de Cuauhtémoc, Chihuahua durante el año 2011 y el escenario obtenido para el año 2019.

	Pastizales	Urbano o edificado	Agua	Bosque	Agrícola	Suelo desnudo	Cobertura total año 1 (2011)
Pastizales	5624.82	11.52	0	0	0	0	5636.34
Urbano o edificado	0	4464.9	0	0	0	0	4464.9
Agua	13.68	0	89.64	0	0	0	103.32
Bosque	0	0	0	2720.79	0	0	2720.79
Agrícola	0	0	0	0	14856.57	0	14856.57
Suelo desnudo	0	7.74	0	0	0	1018.44	1026.18
Cobertura total esperada al año 2019	5638.5	4484.16	89.64	2720.79	14856.57	1018.44	28808.1

Fuente: Elaboración propia

La disminución acelerada de los cuerpos de agua en la zona de estudio, resalta la vulnerabilidad de la zona agrícola circundante a la mancha urbana de ciudad Cuauhtémoc y colonia Anáhuac (Ávila, 2008). Esto debido a que dentro de la región existe una gran cantidad de superficie dedicada para la agricultura de riego, si los cuerpos de agua superficiales dejan de existir, las aguas subterráneas comienzan a ser explotadas con el objetivo de mantener la zona productivamente activa. Sin embargo, cuando el agua comienza a escasear, trae consigo la pérdida del uso de suelo agrícola, de tal forma que si una superficie se vuelve poco rentable para este uso, lo más probable es que se convierta en otro y mientras se encuentre más circundante al área urbana, la probabilidad de cambio para uso urbano es mayor (Tang et al, 2008), tal y como ocurrió en este trabajo, donde la ciudad consume los usos de suelo circundantes a ella.

El crecimiento urbano de la ciudad de Cuauhtémoc y colonia Anáhuac, presenta un crecimiento desordenado en el que se están comprometiendo las zonas productivamente agrícolas, además ante las presentes temporadas de sequía los cuerpos de agua se están reduciendo, sin mencionar los efectos medioambientales que esto pudiera traer (Beltrán, 2005; Vásquez et al 2008). Este fenómeno resalta el uso inadecuado de políticas de planeación, provocando fuertes impactos sobre el ambiente, pues el sistema urbano en el área de estudio puede ser considerado como un ecosistema artificial que termina de tipo “parasito”, debido a que extrae recursos y energía de los ecosistemas vecinos (Alberto, 2009), degradándolos al punto de hacerlos poco funcionales o en un caso extremo, acabar con ellos.

Por otra parte la EMC es una parte importante en la elaboración de este trabajo de investigación, ya que permite determinar la aptitud del territorio para un uso de suelo específico, como Barredo (1996) señala,

son “un conjunto de técnicas orientadas a asistir en procesos de toma de decisiones” además de ser considerada como una herramienta de gran utilidad en la elaboración de políticas de planeación, como puede ser en el ordenamiento ecológico del territorio, tal y como lo demandan los términos de referencia propuestos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2010) en México.

El modelo de simulación de cambio de uso y cobertura de suelo permitió señalar las tendencias del crecimiento urbano en ciudad Cuauhtémoc y colonia Anáhuac, de tal forma que es posible señalarlo como una herramienta de análisis espacial que permite evaluar el impacto de un uso específico sobre otro, sobre todo cuando se aborda desde una perspectiva geográfica (Henríquez et al, 2006, Ye y Bai, 2008; Samat, 2009).

La EMC además de permitir obtener mapas de aptitud, resulta ser de gran utilidad en los modelos de simulación de cambio, ya que como señala Sandoval (2009), permite limitar “*secuencias ilógicas en las proyecciones de los procesos de cambio*”, es decir, especializa una celda para un uso específico, de tal forma que el modelo de predicción basado en autómatas celulares aplicado al área de estudio permitió proyectar el cambio de los usos y coberturas de suelo en función de criterios observados, apegándolo mucho más a la realidad (Pascual et al, 2010).

El uso de índice Kappa como parámetro de validez para mapas categóricos elaborados a partir de capas raster es una técnica muy bien definida (Barreira et al, 2012), de hecho Santé (2010) hace una revisión exhaustiva al respecto. Sin embargo, quienes tradicionalmente utilizan esta medida como forma de cuantificación en la precisión (Pontius y Millones, 2011) sugieren no seguir utilizando el Kappa tradicional y en su lugar, utilizar aquellos que contemplan la

concordancia en la cantidad y localización de píxeles (Pontius, 2000). Partiendo del supuesto anterior, el modelo de predicción basado en autómatas celulares, fue aceptado con un alto índice de concordancia Kappa (0.98) (Sousa et al, 2002).

Debido a que las tendencias de cambio de uso de suelo para el año 2019 resultan ser muy conservadoras, se debe tomar con precaución este resultado, principalmente por que los cambios señalan mayormente la pérdida de suelo agrícola a causa del crecimiento urbano, de forma que para la elaboración de políticas de planeación urbana, se deben tomar en cuenta no solo los resultados del modelo de predicción, sino también las tendencias de crecimiento reales, las cuales pueden ser observadas en las matrices de transición (Rogan y Chen, 2004; Jiménez et al, 2011).

A pesar de que las matrices de cambio señalaron que el uso agrícola se está convirtiendo en uso urbano, el modelo resultó ser muy conservador en este sentido, de forma que principalmente el suelo desnudo y los pastizales, pudieran reducir su superficie para el año 2019, degradando como ya se ha mencionado, al ecosistema natural (Alberto, 2009).

La mancha urbana en el área de estudio está creciendo a costa de diferentes usos y coberturas de suelo, y principalmente el agrícola, en este sentido, cabe destacar la importancia de las políticas de planeación urbana, pues pareciera que no existe restricción alguna para el crecimiento, por lo tanto quizás habría que revisarlas para comprobar el cumplimiento de la ley o de ser necesario replantearlas (Palomo et al, 2011; Hewitt et al 2012).

CONCLUSIONES

Este trabajo es uno de los primeros en la región, de tal forma que se convierte en una base para otros trabajos de investigación que

pretendan definir principalmente si la pérdida de productividad o uso agrícola de las áreas circundantes a la ciudad, está relacionado con el crecimiento urbano, dado que más allá de esto, quizás no sea que el terreno pierda funcionalidad, sino que existen factores de índole social en las que los dueños de esas tierras están obligados a venderlas a fraccionadoras o personas con mayor oportunidad de adquisición. Además de estudios en los que se mida el efecto del crecimiento urbano hacia el medio ambiente, principalmente en términos de pérdida de recursos naturales y recursos financieros, ya que de alguna manera, la tierra le permite al hombre trabajarla para de allí satisfacer sus necesidades.

El análisis espacial del cambio de uso y cobertura de suelo, es una técnica de gran utilidad cuando se trata de cuantificar el grado de conversión ambiental, más aun cuando se integra toda la información en tecnologías con gran capacidad para el análisis, como lo son el caso de los SIG. Específicamente, en el caso del área urbana de ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua y colonia Anáhuac, se puede observar que se está expandiendo considerablemente principalmente a causa de usos de suelo agrícola, de forma que compromete la producción de alimentos y de alguna forma, actúa como coautor en la pérdida de empleos destinados al campo.

La integración de modelos de predicción de uso de suelo con técnicas de EMC en conjunto con los SIG, resultan ser herramientas potentes en la administración del territorio y sobre todo, en el análisis retrospectivo, así como el diagnóstico y pronóstico del estado actual de una superficie determinada. Es decir, se evalúan el pasado, el presente y se pronostica el futuro de cierta situación. Como lo fue en el caso de este trabajo, en el que se observa un incremento considerable de la mancha urbana durante el periodo 1995-2011, además de establecer una posibilidad de cambio para usos

de suelos específicos, aunque este último resultado, debe ser tomado con reserva, dado que se sabe que nadie es capaz de estar al tanto del comportamiento exacto de las cosas en un futuro próximo.

Se debe destacar que el objetivo principal de este estudio no es abordar una temática ambiental, sin embargo, puede ser un trabajo de referencia para la investigación en dicha área, dado que es sabido que los sistemas urbanos actúan como consumidores de energía en ecosistemas cercanos y como en este trabajo resulto, se está acabando principalmente con zonas para uso agrícola, fragmentando el paisaje y dejando algunos otros ecosistemas aislados, como los son los pastizales y en menor medida los bosques.

A pesar de que el modelo de predicción de usos y coberturas de suelo resulto ser muy conservador, permite señalar las tendencias del crecimiento urbano sobre la superficie y aunque los resultados deben tomarse con reserva, señalan cuales podrían ser los efectos posibles de seguir con los patrones de crecimiento actual, que de forma segura continuarán degradando aún más, el ecosistema natural.

Si bien, los resultados de este trabajo señalan los patrones de expansión urbana, deja algunas incertidumbres sobre los impactos posibles de esto, por lo que se debe reconsiderar su utilización en el desarrollo de nuevas investigaciones que evalúen dichos efectos, sobre todo, para el apoyo de políticas públicas de planeación, en las que no se comprometan los recursos naturales.

Por último, a pesar de que se destacan las problemáticas actuales en cuanto a cambio de uso y coberturas de suelo, así como la pérdida de zonas agrícolamente productivas debido al crecimiento urbano, pareciera no haber regulación en este proceso, por lo que es de suma importancia que los planificadores de la ciudad asuman un compromiso para el

desarrollo de la misma, sobre todo, en actividades que permitan formar sinergias entre la sociedad, el medio ambiente y los sistemas económicos, debido a que un crecimiento desordenado afecta directamente a estos sectores, dicho de otra manera, se establezcan mecanismos para un desarrollo regional sustentable.

REFERENCIAS

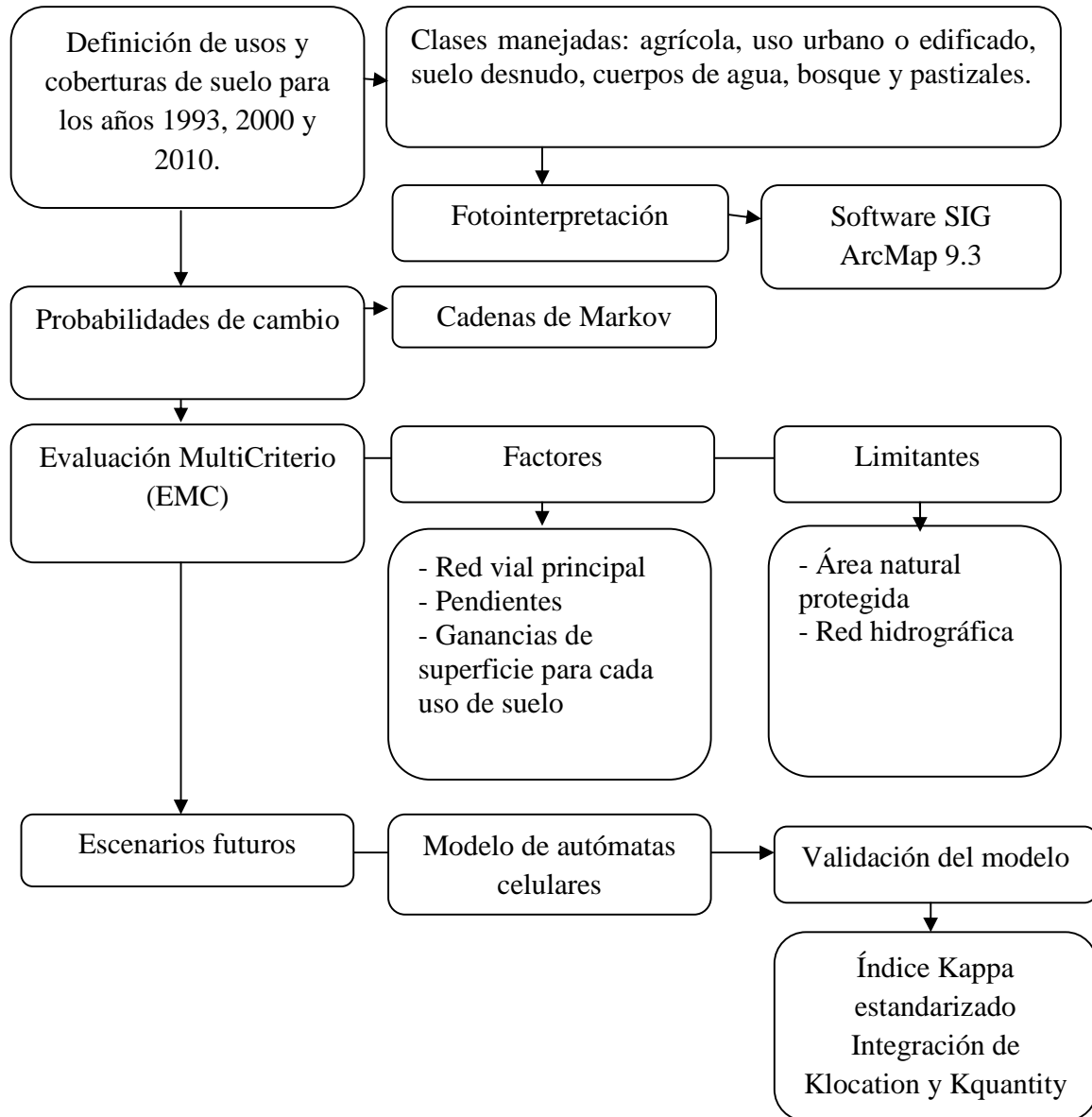
- Aguilar Estrada, S. A., Bencomo Sáenz, J. A., Fierro Macías, C. D., Legarreta Miranda, C. K., Loya Carrillo, J. O., y Bravo Peña, L. C. (2010). Cambios de cobertura vegetal y uso del suelo en la ciudad de Hermosillo, Sonora durante los años 1981, 1996 y 2004. Un análisis a partir de la fotointerpretación en fotomapas digitales generados en gabinete. *Memorias del XIV Simposium Internacional SELPER*, (págs. 1-11). Guanajuato, Guanajuato, México.
- Alberto, J. A. (2009). Geografía y Crecimiento Urbano. Paisajes y Problemas Ambientales. *Geográfica Digital*, (11), 1-13.
- Ávila García, P. (2008). Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México. *CIENCIAS*(90), 48-57.
- Banco Mundial. (2002). *DEPweb - World Bank*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2012, de DEPweb - World Bank: <http://www.worldbank.org/depweb/spanish/modules/social/pgr/index.html>
- Barredo Cano, J. I. (1996). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid: Ra-Ma.
- Barreira González, P., Aguilera Benavente, F., y Gómez Delgado, M. (2012). Propuesta de un análisis de sensibilidad para validar modelos prospectivos de simulación de crecimiento urbano basados en autómatas celulares. *GeoFocus*(12), 303-328.
- Beltrán, J. P. (s.f.). Bogotá región: crecimiento urbano en la consolidación del territorio metropolitano.
- Berlanga Robles, C. A., y Ruiz Luna, A. (2007). Análisis de las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacápan-Agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite Landsat. *Universidad y Ciencia*, 23(1), 29-46.
- Berlanga Robles, C. A., García Campos, R. R., López Blanco, J., y Ruiz Luna, A. (2009). Patrones de cambio de coberturas y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit (1973-2000). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 7-22.
- Bocco, G., Mendoza, M., y Maserá, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 18-38.
- Durán López, H. (2004). El impacto Económico de la Pendiente Topográfica en la Vivienda. *Investigación y Ciencia*(30), 17-22.
- Eastman, R. J. (2003). *IDRISI Kilimanjaro Guide to GIS and Image Processing*. USA: Idrisi Production.
- Garza, G. (2002). Evolución de las ciudades mexicanas en el siglo XX. *Notas. Revista de Información y Análisis*, 7-16.
- Gómez Delgado, M., y Barredo Cano, J. I. (2006). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio*. España: Alfaomega Ra-Ma.
- González, L. P., Alvarado Gate, R., Macías Rodríguez, J., Olvera González, S., Mendoza Sánchez, S. L., y Pérez Fernández, M. D. (2011). *Diagnóstico local sobre la realidad social, económica y cultural de la violencia y la delincuencia en el Municipio de Cuauhtémoc*. Cuauhtémoc, Chihuahua.
- Goodchild, M. F. (2000). New horizons for the social sciences: geographic information systems. *Social Science for a Digital world: Building Infrastructure and Databases for the future*, 163-172.
- Henríquez Ruiz, C., y Azócar García, G. (2007). Propuesta de modelos predictivos en la planificación territorial y evaluación del impacto ambiental. *Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 245(41).
- 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*, 61-74.
- Hewitt, R., Hernández Jiménez, V., y Escobar, F. (2012). Agentes, escenarios y autómatas celulares; modelización espacial para la toma de decisiones en Doñana y su entorno. 1-10.

- INEGI. (2011). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2012, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.inegi.org.mx/default.aspx>
- Jiménez Moreno, M. J., González Guillen, M. D., Escalona Maurice, M., Valdez Lazalde, J. R., y Aguirre Salado, C. A. (2011). Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso de suelo urbano. *Redalyc*, 17(3), 389-406.
- Leutner, B. F., Reinejing, B., Müller, J., Bachmann, M., Beierkuhnlein, C., Dech, S., and Wegmann, M. (2012). Modelling Forest a-Diversity and Floristic Composition - On The Added Value of LiDAR plus Hyperspectral Remote Sensing. *Remote Sens*, 2818-2845.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., and Chipman, J. W. (2008). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Martínez Rivera, S. E., y Monroy Ortiz, R. (2009). La expansión urbana sobre el campo mexicano. La otra cara de la crisis agrícola. *Estudios Agrarios*, 29-46.
- Palomo, I., Martín López, B., López Santiago, C., and Montes, C. (2011). Participatory Scenario Planning for Protected Areas Management under the Ecosystem Services Framework: the Doñana Social-Ecological System in Southwestern Sapine. *Ecology and Society*, 16(1), 1-33.
- Pascual Rosa, V., Aguilera Benavente, F., Gómez Delgado, M., & Bosque Sendra, J. (2010). Ordenamiento deseable para la aglomeración urbana de Granada en 2020. *I Congreso Internacional de Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica* (págs. 1-19). Alcalá de Henares: Servicio de publicaciones de la Universidad de Alcalá.
- Pontius JR, R. G., and Millones, M. (2011). Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407-4429.
- Pontius, R. G. (2000). Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 1011-1016.
- Priego, Á., Cotles, H., Fregoso, A., Luna, N., y Enríquez, C. (2004). La dinámica ambiental de la cuenca Lemra-Chapala. *Gaceta Ecológica*, 23-38.
- Rionda Ramírez, J. I. (2007). *Desarrollo regional y urbano ante la reestructuración económica en México (1980-2006)*. León, Guanajuato.
- Rionda Ramírez, J. I. (2008). Distribución de la población y crecimiento urbano en México. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 201-218.
- Rogan, J., and Chen, D. M. (2004). Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in planning*, 61, 301-325.
- Rojas Quezada, C. A., Muñiz Olivera, I., y García López, M. Á. (2009). Estructura urbana y policentrismo en el Área Metropolitana de Concepción. *Revista Eure*, 47-70.
- Romero Hernández, D., y López Blanco, J. (2000). Producción e integración de fotomapas digitales para la evaluación del crecimiento urbano. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(42), 48-66.
- Romero, H., Molina, M., Moscoso, C., Sarricolea, P., y Smith, P. (2007). Caracterización de los cambios de usos y coberturas de suelos causados por la expansión urbana de Santiago, análisis estadístico de sus factores explicativos e inferencias ambientales.
- Rosete Vergés, F. A. (2008). *Modelos Predictivos de Cambio de Uso del Suelo en la Península de Baja California, México*. México.
- Rosete, F., y Bocco, G. (2004). Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. *Gaceta Ecológica*.
- Samat, N. (2009). Integrating GIS and CA-MARKOV Model In Evaluating Urban Spatial Growth. *Malaysian Journal of Environmental Management*, 10(1), 83-99.
- Sandoval Verdugo, G. S. (2009). *Análisis del proceso de cambio de uso y cobertura de suelo en la expansión urbana del gran*

- valparaíso, su evolución y escenarios futuros*. Santiago, Chile.
- Santé, I., García, A. M., Miranda, D., and Crecente, R. (2010). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis. *Landscape and Urban Planning*, 96, 108-122.
- SEMARNAT. (2010). Términos de referencia para la formulación de los programas de ordenamiento ecológico local. Recuperado el 7 de Marzo de 2013, de http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamientoecologico/Documents/documentos%20ordenamiento/terminos_referencia_2010/terminos_referencia_locales_19_03_10.pdf
- Sousa, S., Caeiro, S., and Painho, M. (2002). Assessment of map similarity of categorical maps using kappa statistics, the case of Sado Estuary. *Proceedings of ESIG*, 1-6.
- Tang, J., Wang, L., and Yao, Z. (2008). Analyses of urban landscape dynamics using multi-temporal satellite images: A comparison of two petroleum-oriented cities. *Landscape and Urban Planning*, 87, 269-278.
- Thaden Ugalde, J. J. (2012). *Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en el municipio de Guelatao de Juárez, Oaxaca, México*. Iztlán de Juárez, Oaxaca.
- UNESCO. (1999). *Informe Mundial Sobre la Cultura: Cultura, Creatividad y Mercados*. CSIC.
- Vásquez Fuentes, A. E., Romero, H., Fuentes, C., López, C., y Sandoval, G. (2008). Evaluación y simulación de los efectos ambientales del crecimiento urbano observado y propuesto en Santiago de Chile. *Actas del Congreso Nacional de Desarrollo Rural*, (págs. 1-22). Santiago de Chile.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz Gallegos, J. R., Mayroga Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., . . . Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*(62), 21-37.
- Ye, B., and Bai, Z. (2008). Simulating land use/cover changes of nenjiang county based on ca-markov model. *International Federation for Information Processing*, 258, 321-329.

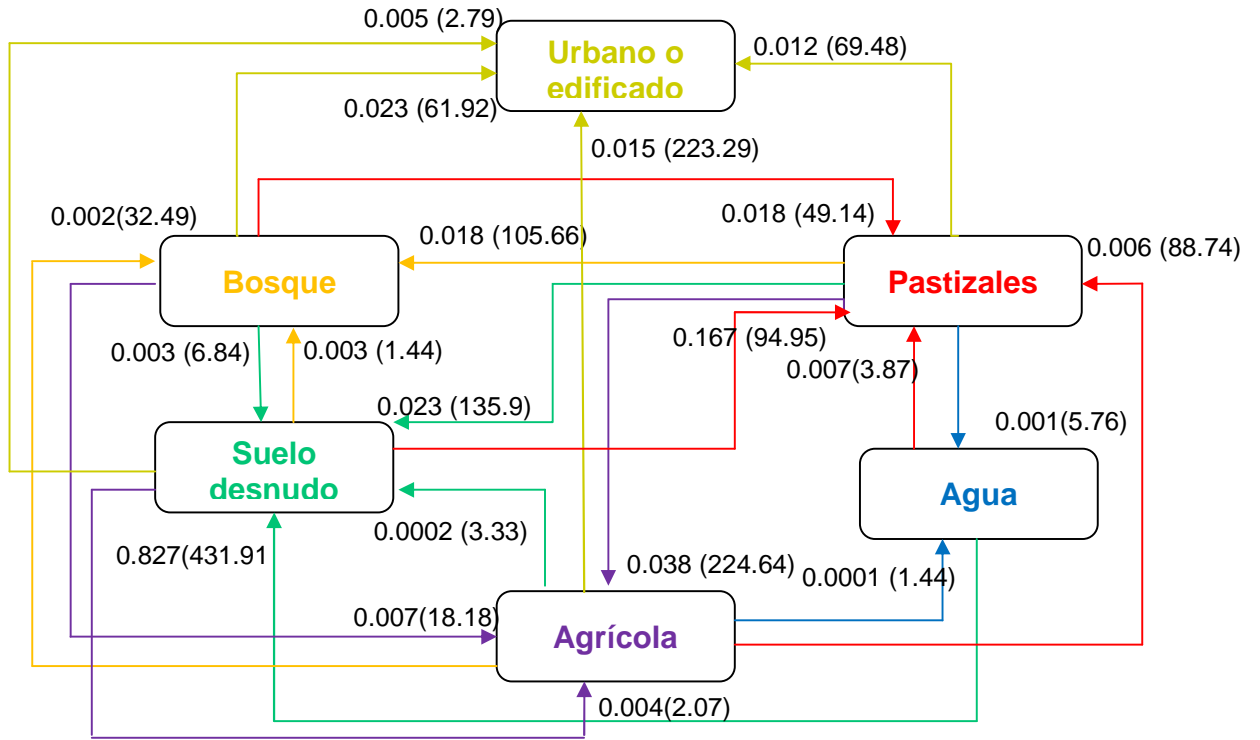
Anexo 1.

Secuencia metodológica

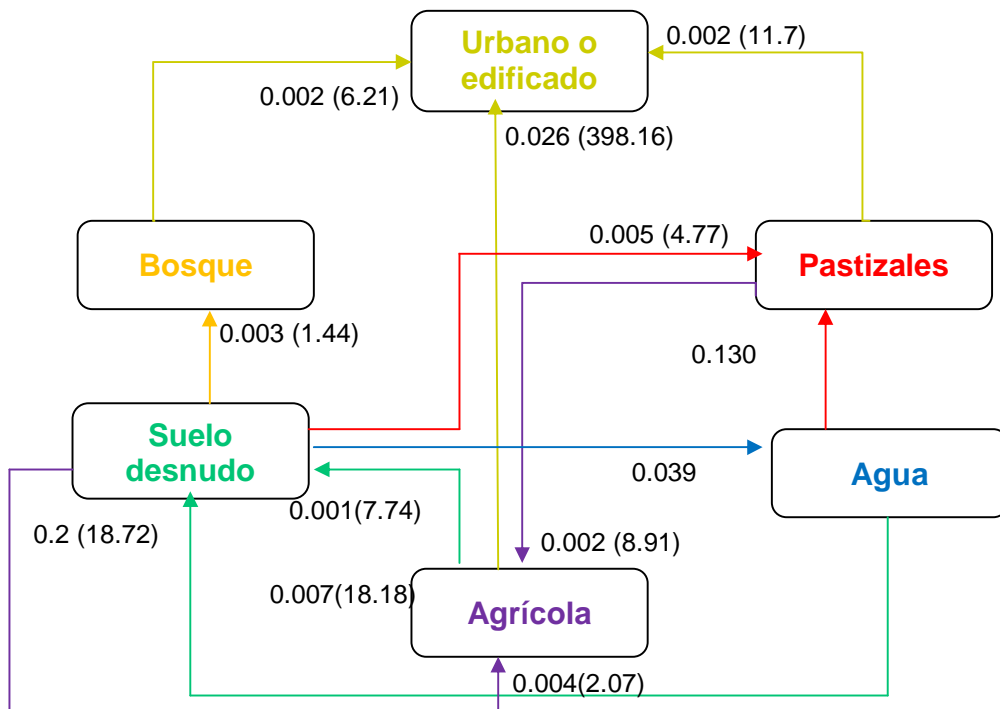


Fuente: Elaboración propia

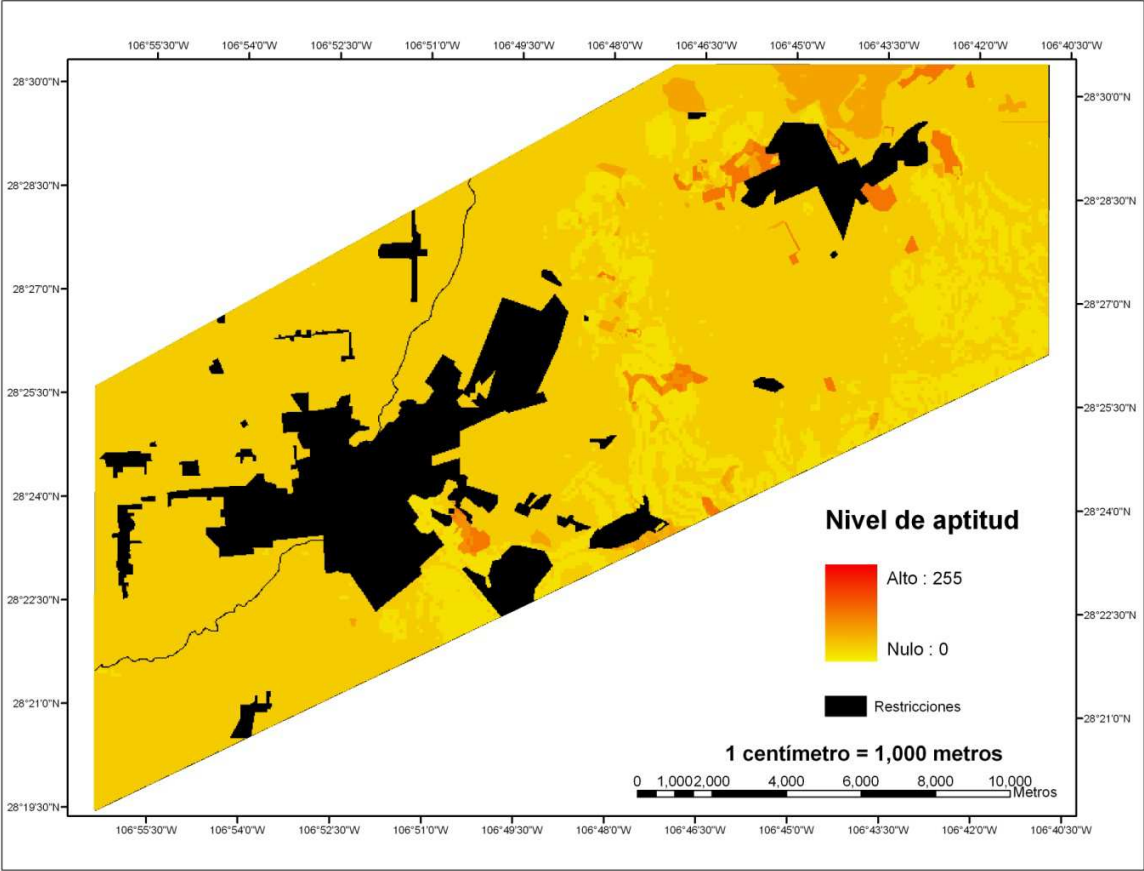
Anexo 2. Diagrama de la matriz de Markov correspondiente al periodo 1995 - 2003. Lo números dentro del paréntesis señalan la superficie de cambio en hectáreas, mientras que los números anteriores, señalan la probabilidad de cambio de clase.



Anexo 3. Diagrama de la matriz de Markov correspondiente al periodo 2003 - 2011. Lo números dentro del paréntesis señalan la superficie de cambio en hectáreas, mientras que los números anteriores, señalan la probabilidad de cambio de clase.

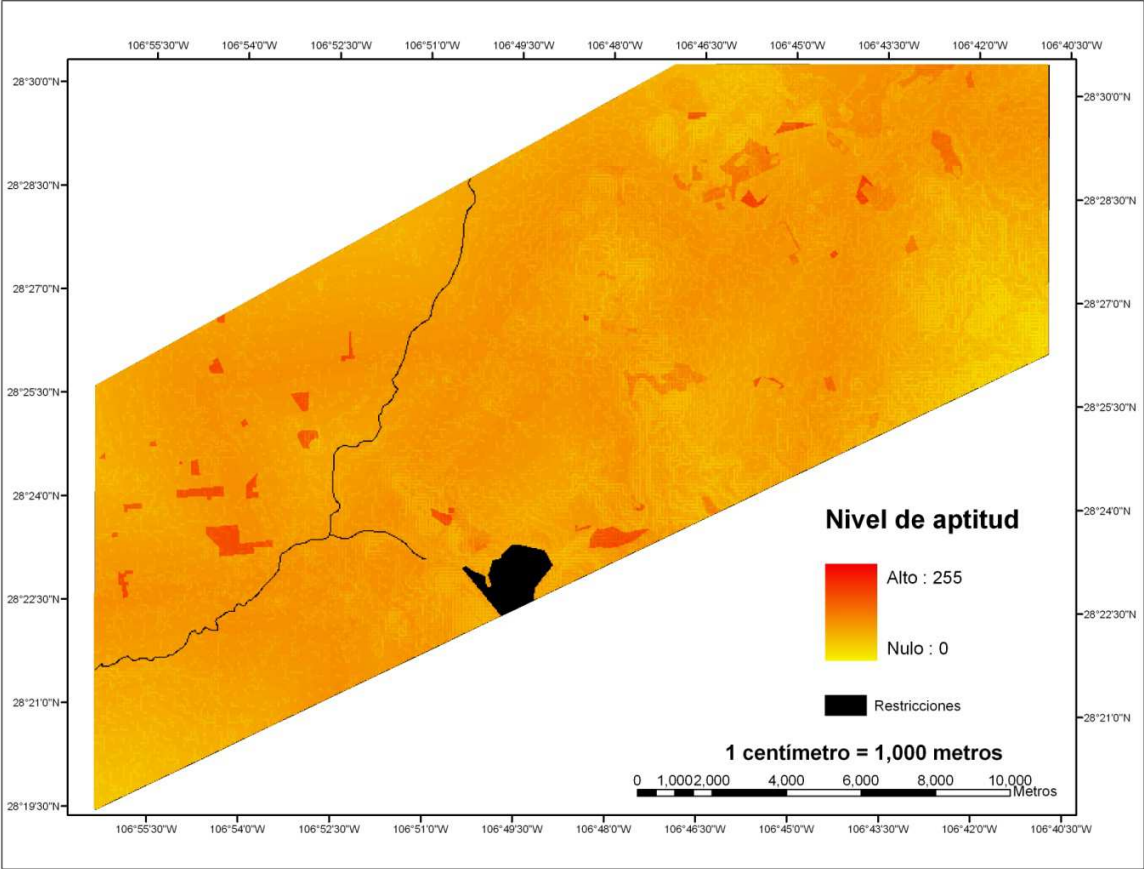


Anexo 4. Mapa de aptitud para uso agrícola.



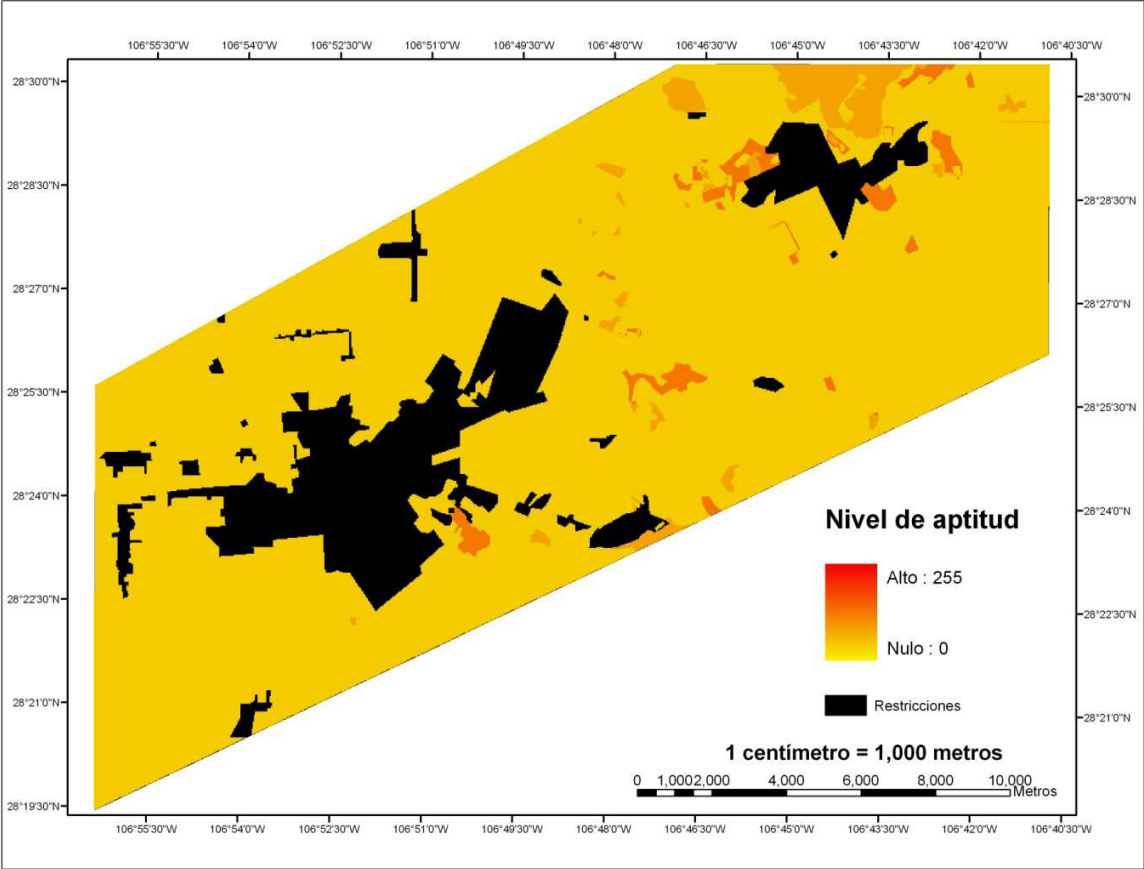
Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Mapa de aptitud para uso urbano.



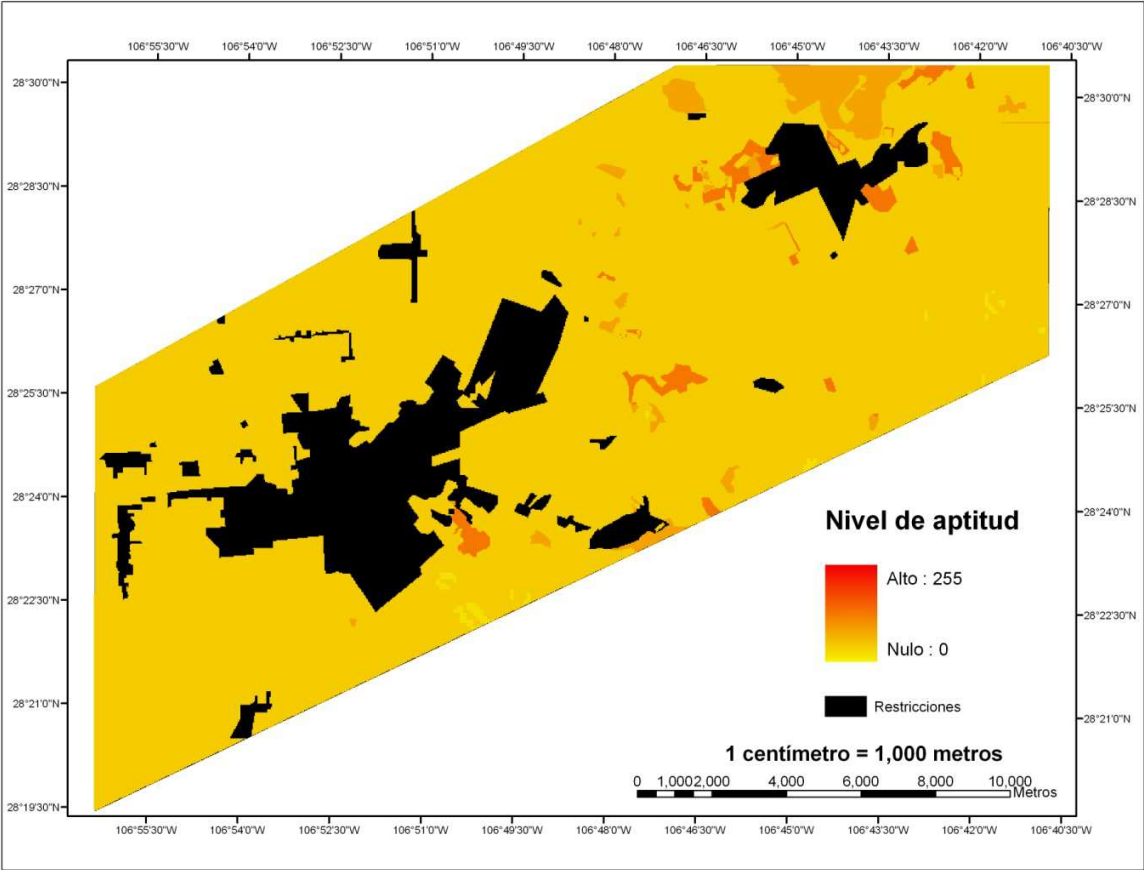
Fuente: Elaboración propia

Anexo 6. Mapa de aptitud para cobertura de suelo desnudo.



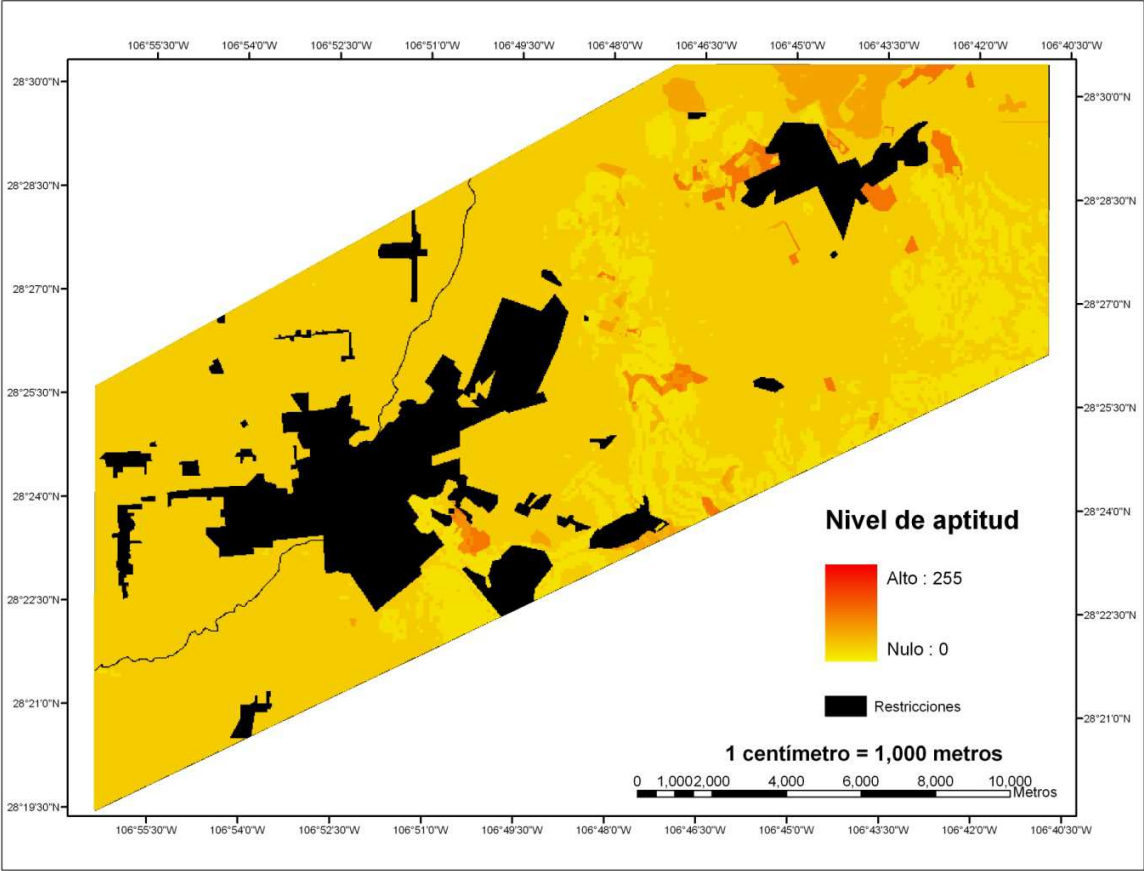
Fuente: Elaboración propia

Anexo 7. Mapa de aptitud para cobertura de bosque.



Fuente: Elaboración propia

Anexo 8. Mapa de aptitud para cobertura de pastizal.



Fuente: Elaboración propia