

La Simulación del Crecimiento Urbano de la Ciudad de Chihuahua Mediante la Aplicación de Autómatas Celulares

Alejandro Brugués Rodríguez, César M. Fuentes Flores, Luis E. Cervera Gómez

Resumen:

El artículo tiene como objetivo simular el crecimiento urbano de la ciudad de Chihuahua mediante el uso de modelos de simulación dinámica como autómatas celulares. En el estudio se aplica el modelo SLEUTH a la Zona Metropolitana de la Ciudad de Chihuahua (ZMCCH). Los requerimientos esenciales de datos fueron generados de tres fuentes; 1) imágenes satelitales del sensor LANDSAT que cubren el período 1973 a 2008. 2) procesamiento del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y 3) información de datos vectoriales del INEGI. La preparación y clasificación espectral de las imágenes satelitales se realizaron en las plataformas del software ENVI y ArcView. Los resultados de la simulación del crecimiento urbano al año 2030 muestra el reforzamiento del proceso de conurbación de la ciudad de Chihuahua con las localidades de Aldama y Santa Eulalia. Así mismo, el modelo permite la generación de escenarios alternos para evaluar algunas herramientas de planeación urbana como la zonificación (protección ambiental de la zona agrícola), dinámica del mercado de bienes y raíces, dinámica de usos del suelo, etc. En general, la simulación del crecimiento urbano es una poderosa herramienta que ayuda a tomar decisiones oportunas en materia de planeación urbana.

Palabras clave: Modelación del crecimiento urbano, Planeación urbana, Autómatas celulares, modelo SLEUTH.

Abstract

The objective of this paper is to simulate the urban growth pattern of Chihuahua City through the use dynamic simulation modeling such as cellular automata. The study applies the SLEUTH model to the Chihuahua City Metropolitan Zone. The data requirements came from 1) satellite images of the LANDSAT sensor that cover the period from 1973 to 2008, 2) the Digital Elevation Model and 3) vector data from INEGI. The preparation and spectral classification of the satellite images were done through the ENVI software and the rest of the procedures were developed through the Geographic Information Systems in Arcview. The results of the simulation of the urban growth until year 2030 show strengthening of the conurbanization process of Chihuahua City-Aldama and Santa Eulalia. Besides, the model allows creating alternative scenarios to evaluate urban planning tools such as zoning (environmental protection of the urban area), dynamics of real state market, dynamics of land use, etc. In general, the urban growth simulation is a powerful tool to help in take decisions about urban planning.

Key words: Urban growth modeling, Urban planning, Cellular automata, SLEUTH model.

La Simulación del Crecimiento Urbano de la Ciudad de Chihuahua Mediante la Aplicación de Autómatas Celulares

Alejandro Brugués Rodríguez¹, César M. Fuentes Flores, Luis E. Cervera Gómez.

I. Introducción

El objetivo del estudio es simular el crecimiento urbano de la ciudad de Chihuahua mediante el uso de modelos de simulación dinámica como el modelo autómatas celulares. La ciudad de Chihuahua en los últimos 35 años ha experimentado un rápido crecimiento urbano que se ha caracterizado por la expansión de su superficie urbana. En este período, el tamaño de la mancha urbana se duplicó, lo cual generó presiones en el suelo disponible para el crecimiento urbano y en los recursos naturales a su alrededor. Así mismo, las necesidades de infraestructura se han intensificado para atender el incremento de la población y las nuevas áreas habitacionales. Lo anterior, ha generado retos en términos del manejo del suelo urbano lo cual ha preocupado a los distintos niveles de gobierno, organismos de planeación urbana, organizaciones de la sociedad civil etc.

En este contexto, los principales avances que se han generado en el campo de la modelación del crecimiento urbano han explorado los principales factores que generan la dinámica del crecimiento urbano. La modelación espacial del crecimiento urbano y su dinámica permiten estudios formales y sistemáticos de posibles escenarios y proveen las bases para la preparación y evaluación de políticas urbanas. Mediante el uso de modelos es posible generar simulaciones del sistema real, a partir del cual se pueden generar pronósticos alternativos y escenarios futuros y así constituirse en un instrumento para investigar la probabilidad de una situación deseada a través de la experimentación.

La modelación del crecimiento urbano a través el uso de modelos de simulación dinámica como el de autómatas celulares (White y Engelen, 1993; Engelen et al, 1995) constituye uno de los recientes avances de los modelos de crecimiento urbano que ha producido una satisfactoria simulación de la expansión física urbana. El desarrollo de este tipo de herramientas de planeación urbana puede ser de gran ayuda para apoyar a planificadores urbanos y tomadores de decisiones a entender y simular el proceso de crecimiento urbano que permiten evaluar distintas políticas tales como conservación ambiental, densificación, control del crecimiento, etc.

II. Los Modelos de Simulación Dinámica y los Sistemas Urbanos.

Explicaciones teóricas y descriptivas del crecimiento urbano han sido bien desarrolladas y documentadas en la literatura desde mediados de los años 50's. A más de medio siglo del desarrollo de esta área del conocimiento se han logrado grandes avances y cambios significativos en la teoría y en las metodologías, particularmente en la evolución de las tecnologías gráficas de sistemas de cómputo y la introducción de nuevos paradigmas.

En los Estados Unidos durante los años 50's y 60's la investigación en la modelación del crecimiento urbano intentó construir modelos urbanos a gran escala (LSUMs por sus siglas en inglés), los que (Lee, 1994) definió como modelos que buscan describir en una forma funcional estructural un área urbana entera, en especial, los usos del suelo, información demográfica y términos económicos. Para ello, se elaboraron modelos matemáticos para aplicaciones de

¹ Los tres son investigadores de El Colegio de la Frontera Norte A.C. sus direcciones de correo electrónico son abrugues@colef.mx; cfuentes@colef.mx y lcervera@colef.mx respectivamente.

planeación urbana y regional que prosperaron en un periodo caracterizado por la introducción de computadoras en la planeación y la emergencia de nuevos campos académicos tales como investigación operacional, economía urbana y la ciencia regional (Wegener, 1994). De acuerdo con (Batty, 1994) ello fue parte de un esfuerzo de transformar la planeación de un arte intuitivo y arquitectónico en una actividad racional y objetiva.

Los modelos urbanos a gran escala fueron esencialmente modelos de interacción espacial con un mecanismo de base económica (teoría macroeconómica, tales como los modelos de la base económica e insumo-producto) que favorecieron un acercamiento de arriba-abajo enfatizando patrones globales. Los modelos siguieron la larga tradición de que el desarrollo del suelo fue modelado de manera equilibrada, macroscópicas y determinísticas.

Modelos del tipo desarrollado por (Lowry, 1964) dominaron los estudios de localización residencial (Wegener, 1994). Lowry sugirió que las actividades industriales más grandes se localizaron de manera independiente a las residenciales, que la venta al menudeo y los servicios se localizan en relación a la demanda residencial, y que las residencias se localizan en relación a la combinación de venta al menudeo y empleo básico. El modelo asume que los trabajadores inician sus viajes a casa desde su centro de trabajo, y se distribuyen a sus sitios de residencia de acuerdo al modelo gravitacional, con los menores viajes a medida que se incrementa la distancia. Hay varias versiones modificadas del modelo de Lowry, las cuales han mejorado el modelo original, tales como el uso del método de decisiones discretas.

Entre los críticos a los LSUM destaca (Lee, 1973) que menciona en primer orden que la escala de los mismos eran muy grandes y demasiadas las expectativas por cumplir. Lee concluye que ninguno de los objetivos de estos modelos fueron alcanzados y había muy pocas expectativas que en el futuro se cumplieran. En su planteamiento, evidenció que los LSUM tenían que cambiar si querían tener alguna influencia en el largo plazo y aportar resultados útiles a los planeadores urbanos. Lee basó sus argumentos, en lo que el denominó, los siete aspectos o pecados capitales de los LSUM's: 1) demasiado complejos; 2) ambición desmedida; una cantidad exagerada de datos; 3) dificultad para percibir relaciones entre variables y ecuaciones; 4) muy complicados: demasiadas variables, ecuaciones e interacciones; 5) Soluciones iterativas basadas en la prueba y el error; 6) costos muy altos y altos requerimientos de computo y por último 7) basado en la percepción de expertos sobre hechos o relaciones no probadas.

A pesar de estas críticas, (Wegener, 1994) pudo identificar 20 centros alrededor del mundo que estaban haciendo investigación a gran escala sobre modelación urbana en la década de los noventa. Lo anterior, fue posible debido al progreso en la teoría, en la información disponible y en la tecnología de cómputo desde la publicación del artículo de Lee. Los sistemas de información geográfica fueron un componente central de estos avances y hubo mucho esfuerzo en vincular estos sistemas a modelos tradicionales espaciales (Batty, 1994).

De acuerdo a (Itami, 1994) aún si tales esfuerzos de modelación no habían fallado en sus intentos de entender los sistemas del mundo real, aún hay una larga brecha entre la magnitud de los problemas sociales y ambientales y los resultados del uso de las teorías tradicionales y métodos para entender esos problemas. Sin duda, el espectro de problemas actualmente abordados por los modelos urbanos es muy limitado. Por su parte (Wegener, 1994) argumenta que si bien la mayoría de las aplicaciones contestan preguntas tradicionales tales como, la manera de regular el suelo o programas de vivienda que podrían afectar el desarrollo de los usos del suelo y el transporte, o como mejorar los sistemas de transporte o como los cambios en el costo de traslado podrían cambiar la distribución de actividades en un área urbana. Estas son y continuarán siendo importantes preguntas, pero otros temas tales como los problemas

ambientales es muy probable que se conviertan en prominentes y será esencial que los modelos urbanos sean capaces de hacer una contribución significativa su discusión racional.

En el contexto del desarrollo sustentable, el entendimiento geográfico de los cambios en el uso del suelo en las áreas urbanas es un aspecto clave para el análisis de la dinámica urbana y su impacto en los sistemas naturales. De acuerdo con (Clarke et al., 1997), la simulación de los patrones espaciales urbanos futuros pueden proveer elementos en como nuestras ciudades pueden desarrollarse bajo variadas condiciones sociales, económicas y ambientales. Sin embargo, para (Itami, 1994) parte de los retos de modelar interacciones entre los procesos naturales y sociales es el hecho de que los procesos de estos sistemas resultan en complejos comportamientos espacio-temporales.

Desde finales de la década de los ochentas las aplicaciones de sistemas de cómputo en planeación urbana han cambiado dramáticamente. Los métodos de arriba-abajo fueron remplazados por los métodos de abajo-arriba. Lo cual ocurrió como consecuencia de la introducción de un nuevo paradigma basado en la complejidad, auto organización, caos y en los cambios en la tecnología de computación (Batty y Densham, 1996).

En estos nuevos modelos el sistema de comportamiento caótico es determinístico. Los pequeños cambios a micronivel pueden resultar en cambios dramáticos a macronivel (método de abajo-arriba). En otras palabras, los modelos basados en asumir que nada de lo que sucede en nuestro mundo es determinado por las reglas y sólo las reglas están abiertas a objetivos de entendimiento (Couclelis, 1997).

Uno de los ejemplos de estos nuevos conceptos y técnicas en la modelación de dinámicas urbanas incluyen a las autómatas celulares (CA). El estudio de las autómatas celulares se remonta a finales de la década de los 40s con la investigación desarrollada por Neumann y Ulgam (Engelen et al., 1997). Después de lentos progresos en la década de los 60s y 70s los CA gradualmente recibieron mayor atención en algunas disciplinas científicas, principalmente en física, matemáticas, ciencias computacionales y biología. Recientemente, el interés en CA entre científicos interesados en el análisis espacial ha crecido rápidamente y muchas nuevas aplicaciones se encuentran bajo desarrollo. Lo anterior debido a que los CA's son conceptualmente más claros, más precisos, y más completos que los sistemas matemáticos convencionales y debido a que están basados en reglas de transición que son más simples que las complejas ecuaciones matemáticas, pero producen resultados que son más comprensibles. En este sentido se han establecido como una significativa y promisoría aplicación en la modelación de dinámicas urbanas y regionales. Importantes aportaciones en este campo incluye los modelos desarrollados por White y Engelen (White y Engelen, 1993, 1994, 1997; Engelen et al. 1995, 1997; White et al. 1997), así como por Clark (Clark et al. 1997; Clarke y Gaydos, 1998), y (Li y Yeh, 2000).

En el caso de México han existido algunos avances en el uso de modelos de simulación dinámica del crecimiento urbano. Peña y Fuentes, (2007) simularon los cambios en el uso del suelo de Ciudad Juárez, mediante el uso del programa Stella®. Los resultados del modelo permiten simular la demanda de suelo urbano por usos del suelo (comercial, industrial y residencial) en los próximos 10 a 20 años. El modelo puede ayudar a determinar la cantidad de suelo necesario y la distribución en los distintos usos del suelo en los próximos 20 años. Una limitante de esta técnica es que simula la cantidad de suelo necesario para cada uso del suelo en un determinado periodo de tiempo, pero al ser una modelación espacial no se sabe en que parte de la ciudad se distribuirán. Por su parte, Suárez y Delgado (2007) modificaron la metodología propuesta por Landis y Reilly (2003) en su pronóstico del crecimiento urbano del

estado de California en el año 2100. Los cuales construyeron un modelo de regresión logístico binomial que opera sobre una serie de variables económicas, de infraestructura y de relieve, cuyos resultados se interpretan como probabilidades de urbanización. Los resultados para la Ciudad de México revelan una expansión de la superficie urbana para el año 2020, según el escenario de entre 38 mil y 56 mil hectáreas. La principal conclusión se refiere a la necesidad de contar con modelo de administración pública metropolitana conjunta para controlar la forma de expansión y para regular los usos del suelo de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Aguilera (2002) publicó un libro en el cual introduce al lector al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares y desarrolla un modelo computacional y el paquete que se realizó (Sistema de modelado de uso del suelo basado en autómatas celulares) para estudiar la forma experimental el autómata celular de White. Sin embargo, no intentó aplicar su modelo a ninguna ciudad específica.

III. La Rápida Expansión Urbana de la Ciudad de Chihuahua

La Zona Metropolitana de la Ciudad de Chihuahua (ZMCCCH)² ha mostrado un acelerado crecimiento demográfico que se ha traducido en un rápido proceso de urbanización. Por una parte, en tres décadas y media la población casi se triplicó, pasando de 277, 099 habitantes en 1970 a 713,613 en el año 2005. Sin embargo, dicho proceso en los últimos años muestra una tendencia hacia la estabilización. Lo anterior, se refleja en el comportamiento que han mostrado la tasa de crecimiento poblacional que ha pasado de 5.5% en 1970 a 1.6% en el año 2005. Este hecho, junto a otros componentes de la dinámica demográfica da elementos para considerar que la ciudad pasa por un proceso de transición demográfica (Fuentes, 2007). Por la otra parte, el crecimiento de la mancha urbana se aceleró sobre todo a partir de la década de los noventa. Durante el periodo 1980 a 1995 el ritmo de expansión de la mancha urbana fue del 48%. De la misma forma de 1980 al año 2005 la superficie urbana creció a más del doble, es decir pasó de 8,489 a 19,024 hectáreas (ver cuadro 1). En términos de la tasa de crecimiento de la mancha urbana estas se mantuvieron por arriba de la de la población.

La diferencia en la tasa de crecimiento de la mancha urbana y la población explica en gran medida el crecimiento expansivo de la mancha urbana. Lo que se manifiesta en una caída continua de la densidad de población, que pasó de 67.35 (hab./ha) en 1970 a 37.51 en el 2005.

Cuadro 1. Dinámica poblacional y superficie urbana, Chihuahua.

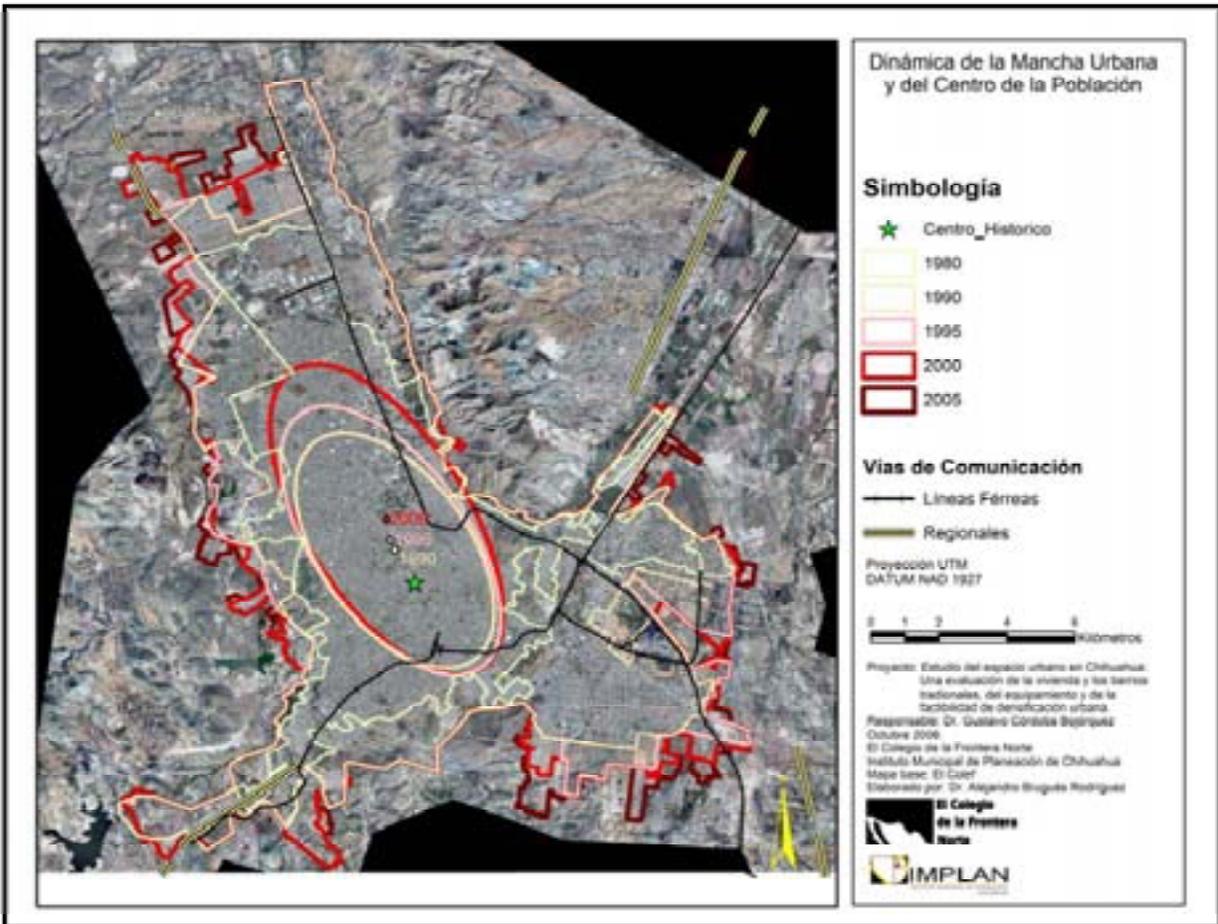
Año	Población	Tasa de Crecimiento (%)	Superficie Urbana (ha)	Tasa de Crecimiento (%)	Densidad de Población (hab/ha)
1960	150,430				
1970	257,027	5.5	3,815.78		67.35
1980	385,603	3.9	8,489.16	7.9	45.42
1990	516,153	3.0	15,097.91	5.7	34.18
1995	613,722	3.0	16,515.04	0.9	37.16
2000	657,876	1.6	18,055.04	1.8	36.43
2005	713,613	1.4	19,024.07	1.5	37.51

Fuente: INEGI, Archivo histórico de localidades y Ciudades capitales, una visión histórico urbana.

² La Zona Metropolitana de la Ciudad de Chihuahua esta formada por las localidades de Juan Aldama, Santa Eulalia y Chihuahua (SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2007).

En los últimos años el crecimiento urbano se generó en forma de anillos concéntricos en un primer momento para posteriormente expandirse sobre los principales ejes carreteros, sobre todo hacia el norte. Lo anterior se confirma con la forma que ha tomado la estructura urbana la que es más angosta en el eje oriente-poniente y alargada en el eje norte-sur (ver mapa 1).

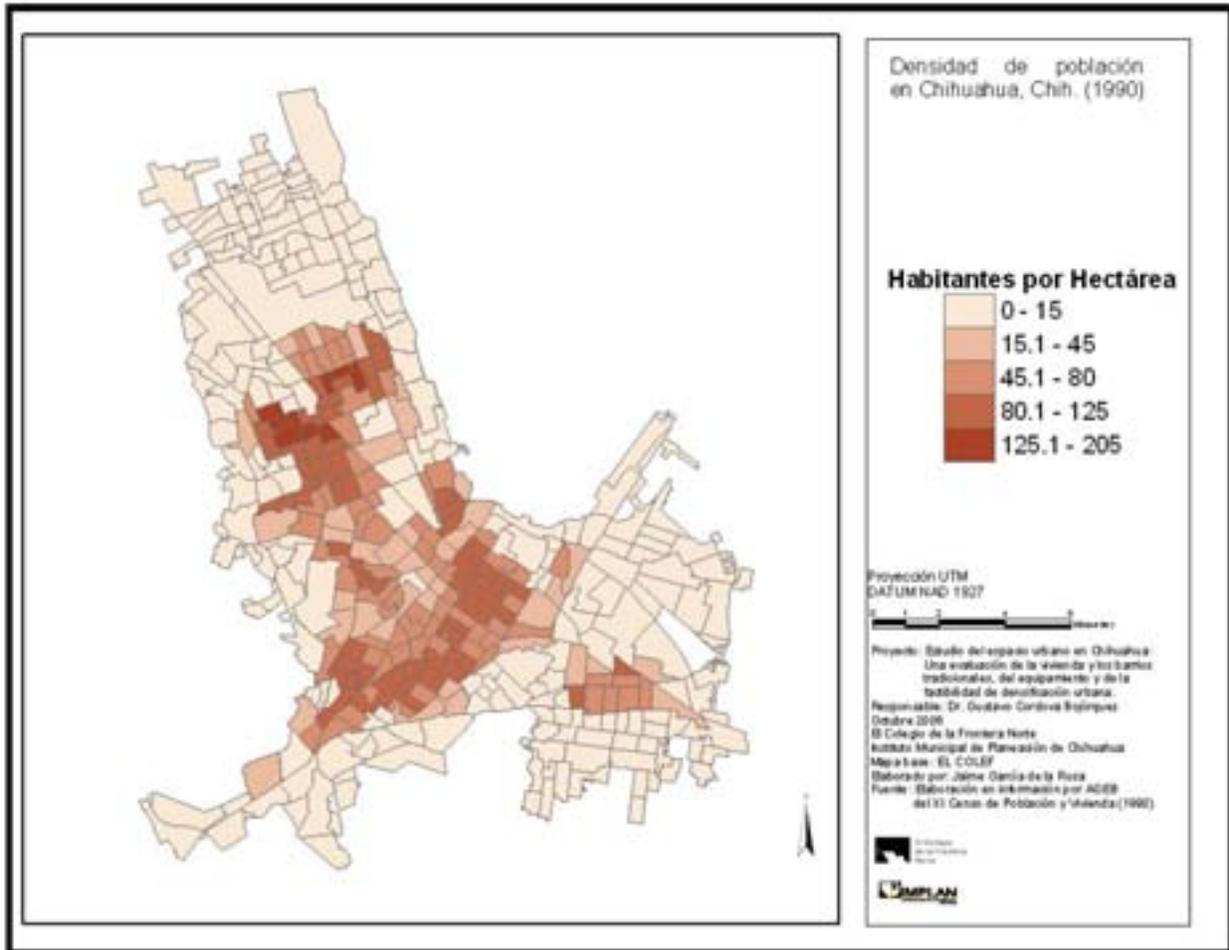
Mapa 1 Dinámica de la mancha urbana y del centro de población de Chihuahua



Fuente: Elaboración propia El Colegio de la Frontera Norte, 2006

A nivel espacial se observa los cambios en la distribución de la población de la ciudad de Chihuahua mediante el uso de la densidad de población como indicador. En 1990 densidad de población de la ciudad en su conjunto fue de 34.18 habitantes/hectárea (hab./ha), las densidades más bajas (menos de 14 hab./ha) se ubican en el norte sobre la carretera a Ciudad Juárez, al poniente en los alrededores del aeropuerto y hacia el sur-oriente en la salida a al carretera a Cuauhtémoc. Las densidades bajas (17.4 a 49 hab./ha) se localizaron en el centro de la ciudad, el surponiente en dirección a la salida a la carretera a Delicias. Las densidades medias (46.8-78.2 hab./ha) y alta (78.9-123.7 hab./ha) se encontraban del centro hacia el norte y sur-poniente. Las áreas más densamente pobladas (135.9 a 204 hab./ha) se encontraban en las colonias que rodean al parque industrial saucito (mapa 2).

Mapa 2. Densidad de población en Chihuahua, Chih. (1990)

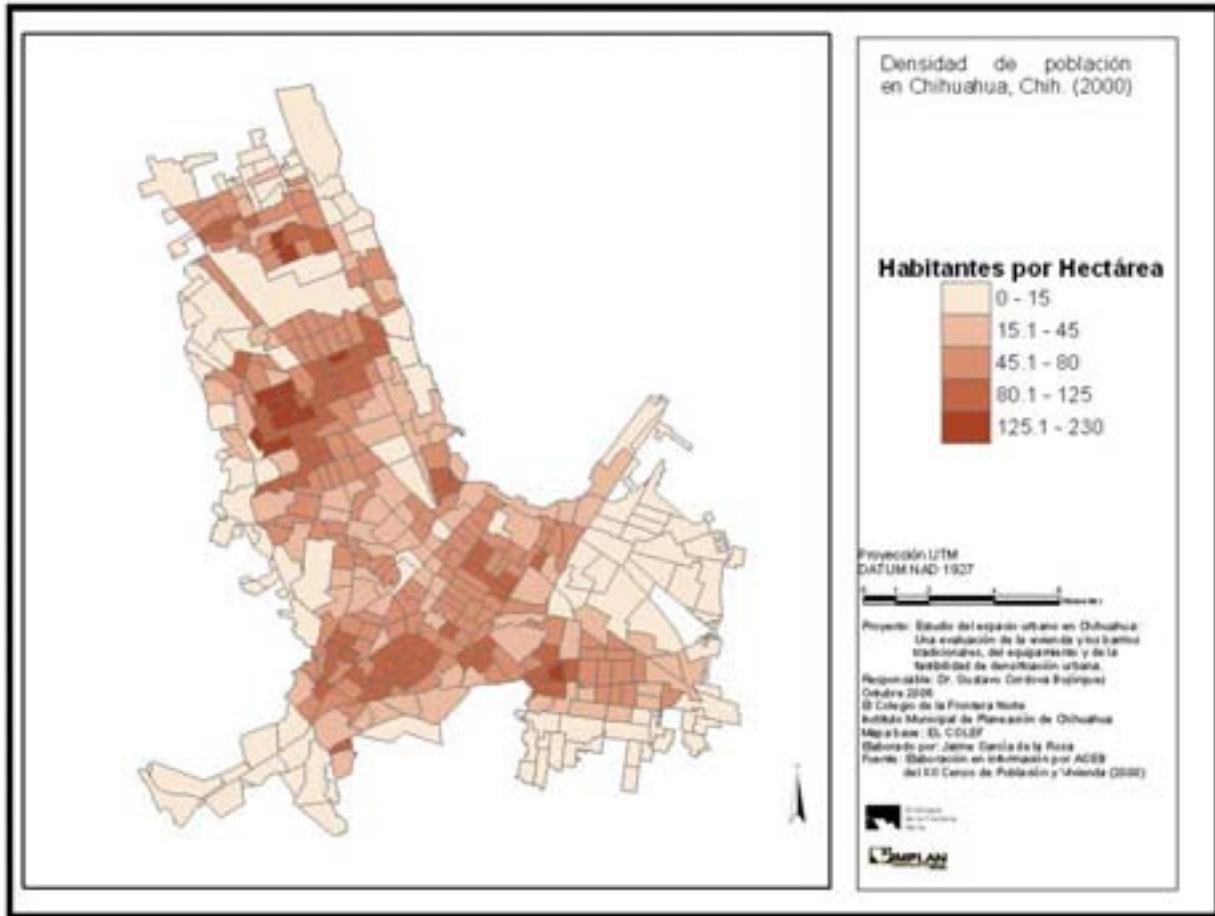


Fuente: Elaboración propia con base a información del XI Censo de Población y Vivienda 1990 (INEGI).

Para el año 2000, se observa con claridad el proceso de reacomodo poblacional que implica la pérdida de población de la zona central y la densificación en zonas alejadas del centro principal sobre todo en el extremo norte. La densidad de población promedio de la ciudad disminuyó, la cual llegó a ser 36.43 (hab./ha). Las áreas que mantienen una baja densidad (0 a 17 hab./ha) son las zonas residenciales localizadas al poniente, los extremos sur poniente y sur oriente. Los sectores de densidad media (48 a 77 hab./ha) se ubican alrededor del centro histórico, los cuales muestran una pérdida paulatina de población.

El extremo norte es el que presenta con mayor claridad un incremento de la densidad de población producto de que en esa dirección se han dirigido los programas de vivienda popular. En dichas áreas habitacionales la densidad ha pasado de baja (0 a 17 hab./ha) a media (48-77 hab./ha) y alta (78-129 hab./ha) sobre todo en los fraccionamientos cercanos a la carretera que comunica a Chihuahua con Ciudad Juárez (mapa 3). De 1990 al año 2000 se observa que el centro de la ciudad está viviendo el típico proceso de expulsión de población hacia la periferia, característico de las ciudades que muestran un modelo de crecimiento extensivo de la superficie urbana tales como las de Estados Unidos y Australia.

Mapa 3. Densidad de población en Chihuahua, Chih. (2000)



Fuente: Elaboración propia con base a información del XII Censo de Población y Vivienda 2000 (INEGI).

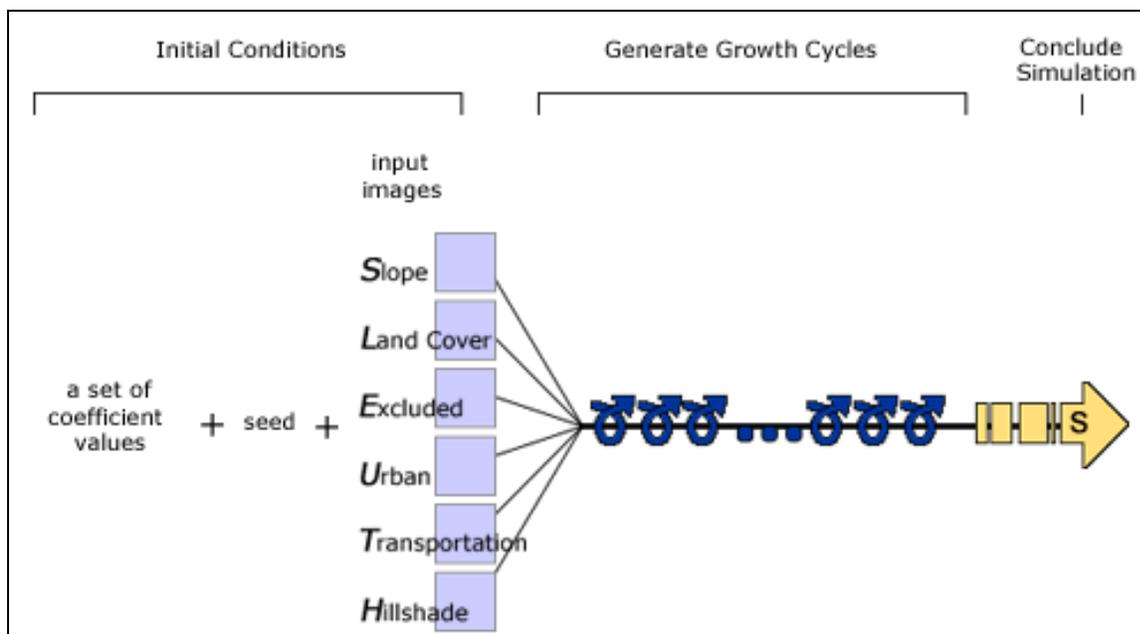
La ciudad enfrenta serios retos en términos del manejo del suelo urbano, lo cual preocupa a los gobiernos, los organismos municipales y estatales de planificación urbana y organizaciones de la sociedad civil. En este contexto, existen técnicas de modelación urbana como el modelo autómatas celulares que puede ser de gran utilidad para explorar los impactos espaciales de la forma urbana bajo los actuales patrones de crecimiento y como podría crecer si las reglas fueran cambiadas.

IV. El Modelo SLEUTH

El modelo SLEUTH fue desarrollado como parte del proyecto *Gigalopolis* del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en colaboración con el Departamento de Geografía de la Universidad de California en Santa Barbara (UCSB). Este es un producto que evolucionó del Modelo de Crecimiento Urbano de Clarke basado en autómatas celulares, de los modelos de elevación y de los modelos de cobertura del suelo aplicados al crecimiento urbano. El nombre del modelo hace referencia a los requerimientos de datos: **S**lope, **L**and cover, **E**xclusion, **U**rban, **T**ransportation, **H**illshade (Pendientes, Cobertura de suelo, Exclusión, Urbano, Transporte, Sombreado de colinas).

El funcionamiento básico del modelo consiste en un ciclo de crecimiento donde a partir de un conjunto de coeficientes, se aplican un conjunto de reglas de crecimiento que luego son comparadas con un conjunto de valores críticos a partir de los cuales se automodifican los coeficientes para generar un nuevo ciclo de crecimiento. La Predicción es un proceso más complejo que parte de un conjunto de condiciones iniciales relacionada al valor de los coeficientes e imágenes de entrada para aplicar repetidamente los ciclos de crecimiento hasta finalizar el proceso en la fecha deseada, tal como se muestra en el diagrama 1. La Simulación es una predicción inicializada a partir de un conjunto diferente de condiciones iniciales.

Diagrama 1. Flujo del proceso de predicción.



Fuente: USGS, Project Gigalopolis: Urban and Land Cover Modeling.

Las reglas de crecimiento del modelo combinan el crecimiento urbano inducido por cuatro fuentes principales: el crecimiento espontáneo, los nuevos centros de expansión, el crecimiento en el límite urbano y el influenciado por las vialidades. Los cuales, para cada caso, relaciona a alguno de cinco coeficientes: dispersión, breed, spread, slope, road gravity. En el siguiente cuadro (Oğuz, 2004:114) resume la relación entre los tipos de crecimiento y los coeficientes del modelo así como una descripción breve de la dinámica de crecimiento del mismo.

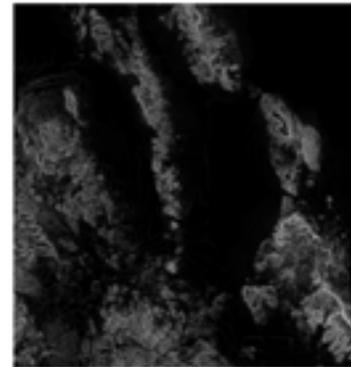
Cuadro 2. Resumen de los tipos de crecimiento simulados por el modelo SLEUTH.

Orden en el Ciclo de Crecimiento	Tipo de Crecimiento	Coefficiente asociado	Resumen
1	Espontáneo	Dispersion	Selección aleatoria de celdas que potencialmente formen un nuevo crecimiento
2	Nuevos centros de expansión	Breed	Centros urbanos en crecimiento a partir del crecimiento espontáneo
3	En el límite urbano	Spread	Viejos o nuevos centros urbanos que generan crecimiento adicional
4	Influenciado por las vialidades	Road-Gravity, Dispersion, Breed	Celdas recién urbanizadas que expanden su crecimiento a través de las redes de transporte
En los cuatro ciclos	Resistencia a las pendientes	Slope	Efecto de la pendiente en la reducción de las probabilidades de urbanización
En los cuatro ciclos	Capa de exclusión	Definida por el usuario	Áreas especificadas por el usuario resistentes o excluidas del desarrollo

Fuente: Oğuz, Hakam (2004:114)

Los requerimientos de datos del modelo, son un conjunto de imágenes raster consistentes en cuanto a la extensión y el tamaño de los pixeles, que como ya se mencionó representan:

Las Pendientes que se derivan de un modelo digital de elevaciones expresadas en porcentajes. El valor de los pixeles es de 0 a 100 y a la derecha se representan en una escala monocromática de negro a blanco.



La Cobertura del Suelo, donde cada valor de pixel representa una clase única de uso del suelo. Donde se han representado como:

- Urbano
- Agrícola
- No Utilizado
- Cuerpos de Agua

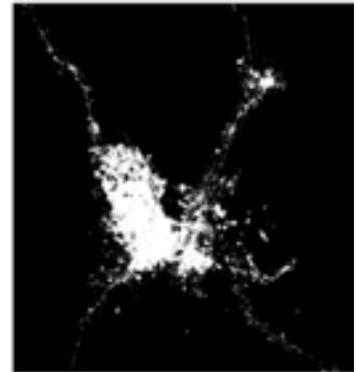


Las áreas Excluidas, donde se representan todas las localizaciones con resistencia a la urbanización. Los pixeles pueden tomar valores de 0 a 100, correspondiendo el mínimo a las áreas sin restricciones a la urbanización y el máximo a la exclusión de las áreas imposibles de ser urbanizadas. Los valores intermedios representan una escala de resistencia a la urbanización.

-  0 Sin restricciones
-  75 Superior a la cota de dotación de servicios
-  102 Cuerpos de Agua
-  103 Aeropuerto



Las Áreas Urbanas, es una representación de las áreas urbanizadas y puede tomar valores de 0 a 255, donde el 0 representa lo no-urbano y el resto de los valores a lo urbano.

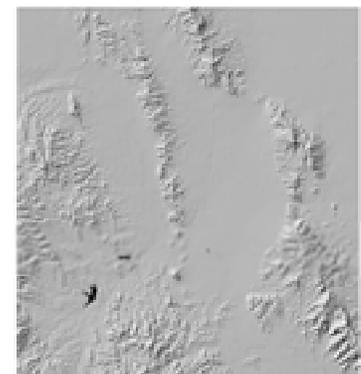


La Red de Transporte, es representada con pixeles que expresan una ponderación de la misma en función de su importancia en el proceso de urbanización, en nuestro caso los pixeles han tomado valores de 4,2,1 y 0 asignándole 4 a las vialidades regionales, 2 a las primarias y 1 a las secundarias.

-  1 Menor Ponderación
-  2
-  4 Mayor Ponderación

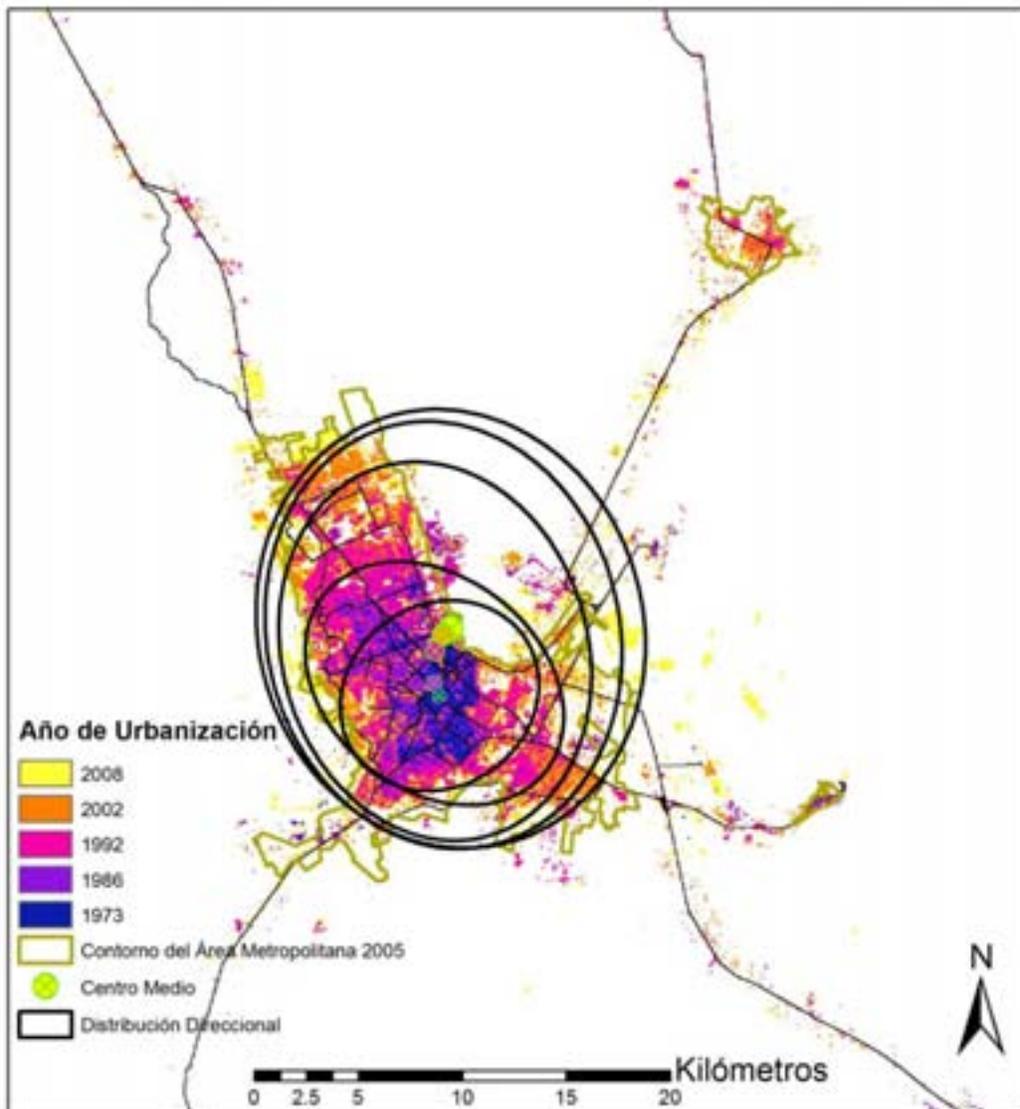


El Sombreado de Colinas (hillshade), es utilizado sólo para dar contexto espacial tri-dimensional al resto de los datos del modelo.



El área de implementación del modelo es la Zona Metropolitana de la Ciudad de Chihuahua (ZMCC) que considera a las manchas urbanas de Juan Aldama, Santa Eulalia y Chihuahua en los municipios de Aldama, Aquiles Serdán y Chihuahua, en donde Chihuahua es el municipio central y los otros se incorporan al área metropolitana con base en el criterio de planeación y política urbana (SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2007). El Área metropolitana de Chihuahua en términos de su población aún es considerada intermedia (de 500,000 a 1,000,000 de habitantes) pues al 2005 alcanzó los 784,882 con una aportación de poco más de 96.6% de su municipio central, y con una dinámica de crecimiento (2.1%) ligeramente por encima de las de su grupo (2.0%) el más dinámico entre 2000 y 2005. La extensión física del área es relativamente pequeña y la mayor distancia entre las áreas es de apenas 12.8 Km, aunque las áreas exteriores no tienen conectividad directa entre sí. No obstante, la dinámica reciente de las superficies urbanas han mostrado una tendencia a la conurbación, como se puede apreciar en el siguiente mapa.

Mapa 5. Dinámica del crecimiento urbano reciente de la ZMCCH.



Fuente: Elaboración propia, Clase Urbana insumos del modelo.

El patrón de crecimiento urbano mostrado en el mapa 5 da cuenta de que el núcleo urbano de 1973 sólo era notable en la ciudad de Chihuahua, que ya para 1986 sufrió una importante expansión con rumbo noroeste, fundamentalmente siguiendo los ejes carreteros de que la conectan con Ciudad Juárez y Cuauhtemoc y el surgimiento de núcleos urbanos alejados de la urbanización principal. Para 1992, la ciudad sufrió una de sus expansiones más notables con un acentuado patrón hacia el norte de la ciudad y donde ya comienzan a ser notable la conformación de la zona metropolitana de la ciudad de Chihuahua. Hacia el año 2002, se continúa con el patrón de crecimiento norte aunque con una ocupación importante al sur de la ciudad, se consolidan además las dos áreas urbanas mencionadas. Para 2008, disminuye la velocidad de la expansión urbana pero es notable nuevamente el surgimiento de núcleos urbanos relativamente alejados del área urbana y sin conexiones viales de importancia al este de Chihuahua y otros altamente asociados a la estructura vial en particular en las carreteras a Ciudad Juárez y a Aldama.

Los insumos esenciales de imágenes para el modelo tienen dos fuentes fundamentales la primera es el modelo digital de elevaciones (MDE) y la segunda son las imágenes satelitales. En el caso del MDE se utilizó el disponible en la página del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) en la sección de Continuo de Elevaciones Mexicano como parte de las descargas gratuitas, escala 1:50:000. A partir del mismo y utilizando las herramientas del módulo de análisis espacial del Software ArcGis, se construyó la imagen de las pendientes calculadas en porcentajes y los sombreados de colinas, ya presentados como parte de los requerimientos de datos del modelo.

Las otras imágenes requeridas por el modelo se refieren a cobertura del suelo, usos urbanos, carreteras y exclusión, en el caso de las tres primeras son necesarias al menos cuatro que cubran el período de estudio que se utilizarán en la fase de calibración como puntos de control para verificar el ajuste de los parámetros del modelo. En su generación, se utilizaron técnicas de percepción remota a partir de imágenes Landsat de los años: 1973, 1986, 1992, 2002 y 2008, que por tener características diferentes en términos de resolución espacial y espectral fue necesario hacer un ajuste para adecuarlas a los requerimientos del modelo.

Cuadro 3. Resumen de las características de las imágenes utilizadas.

Insumo SLEUTH	Fuente de datos	Tipo	Fecha	Resolución (metros)	No. De bandas
	USGS	L5 MSS	06/02/1973	60	4
Land use/land cover	USGS	L5 MSS	04/18/1986	60	4
Urban	USGS	L5 MSS	04/10/1992	60	4
Roads*	USGS	L7 ETM+	03/05/2002	30	9
	USGS	L7 ETM+	09/06/2008	30	9
Slope, Hillshade	INEGI	Modelo Digital de Elevaciones		0.00027777778	1
Excluded	INEGI	Curvas de Nivel			

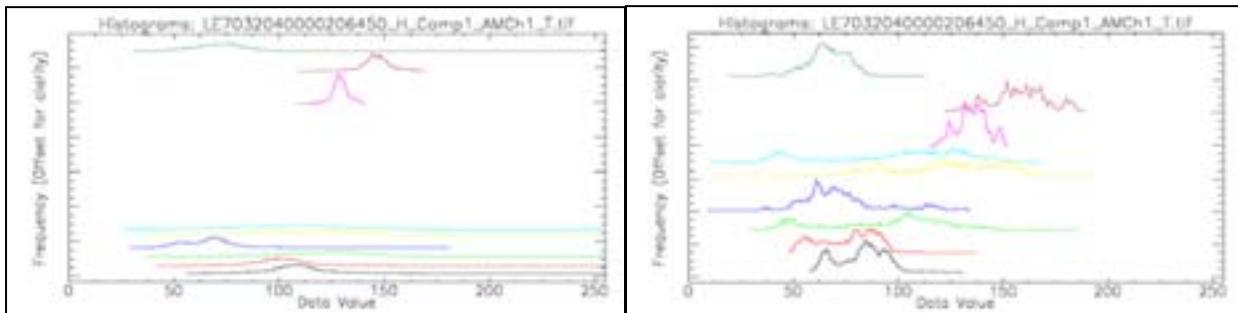
* Combinada con información vectorial del INEGI.

En la preparación y clasificación espectral de las imágenes satelitales se utilizó el software ENVI. A partir de las imágenes en primer término se seleccionó sólo el área de interés para el estudio y luego se procedió a la Clasificación Supervisada de las imágenes utilizando el método conocido como Support Vector Machine que se considera un buen algoritmo cuando se dispone de datos complejos o con "ruido". Este algoritmo pertenece al grupo de clasificación

supervisada, que supone la definición de “áreas de entrenamiento” donde el operador conoce anticipadamente cual debe ser el resultado de la clasificación y delimita en ellas áreas las clases a utilizar por el algoritmo, su funcionamiento supone la construcción de una firma espectral de las áreas delimitadas y la comparación de cada uno de los pixeles de la imagen con las referidas firmas a partir de las cuales generar una decisión sobre el grupo de pertenencia del pixel analizado.

En el siguiente gráfico se presentan las firmas espectrales generadas en el caso de Chihuahua utilizando la imagen Landsat 2002 para las clases Urbana (izquierda) y Agrícola (derecha), en los gráficos se han representado las respuestas obtenidas para cada una de las nueve bandas del espectro electromagnético de que se compone la imagen. Como se puede apreciar la respuesta urbana es más amplia y menos variable que la agrícola. Esto se debe a que la mancha urbana es detectada como una gran superficie más homogénea donde se tiene cobertura por asfalto, concreto y el material del techo de las viviendas. En el promedio y dentro del campo visual del espectro tienden a ser similares ya que la diferencia de la reflectancia entre estas superficies no es tan marcada. En el caso de la cobertura agrícola se tienen unidades o parcelas muy bien delimitadas con firmas espectrales muy bien definidas para los diferentes estatus del suelo y de la vegetación. Por ejemplo, suelo desnudo seco y suelo desnudo seco, suelo en reposo con malezas, diferentes cultivos (maíz, algodón, avena, alfalfa, etc.) y diferentes estatus fisiológicos de las plantas (germinación, planta en pleno desarrollo – muy verde- y plantas por cosecharse (secas).

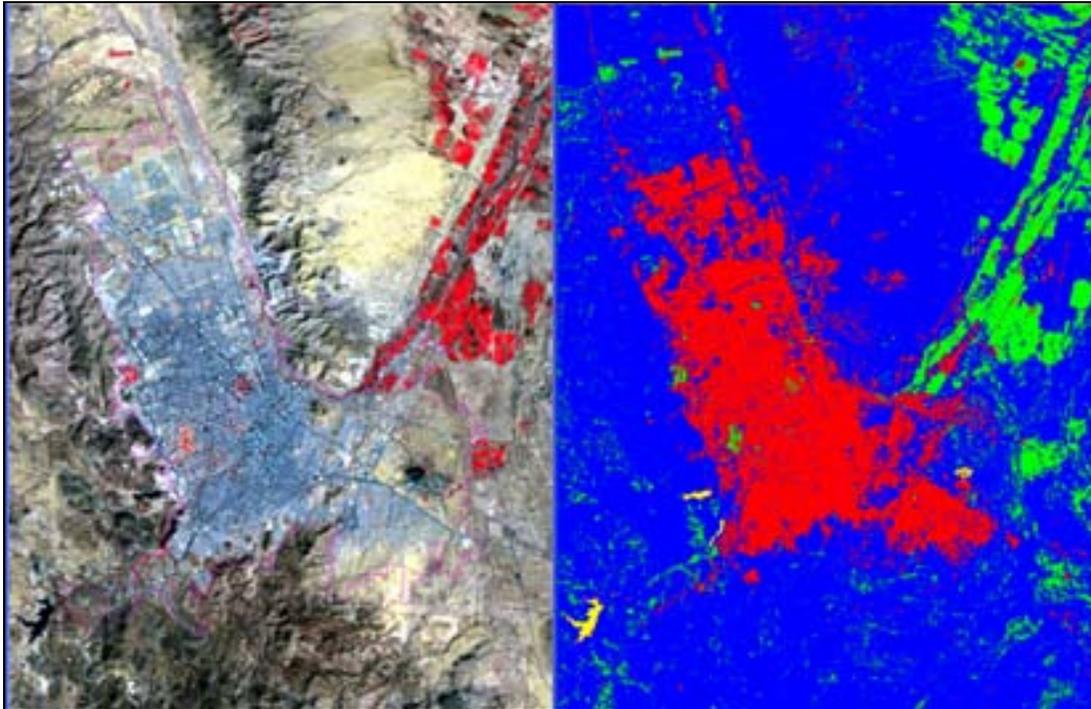
Gráfico 1. Firmas espectrales Urbana (izquierda) y Agrícola (derecha) utilizando la imagen Landsat 2002 especificada.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la clasificación para las clases consideradas (Urbano, Agrícola, Espacios desocupados, Cuerpos de Agua) se muestran en la siguiente gráfica, a la derecha se presenta la composición (RGB o bandas 4,3,2) de la imagen Landsat 2002 y a la derecha los resultados de la clasificación, existiendo una correspondencia espacial entre ambas. En ella se puede apreciar a las áreas urbanas representadas en rojo a la derecha y donde es posible apreciar como al norte de la ciudad existen espacios intra-urbanos desocupados identificados como tal (en azul) y áreas con cobertura vegetal que en la imagen aparecen en rojo y que se han clasificado como tales y representadas en verde en la imagen clasificada. En la clasificación se puede apreciar a la derecha de la imagen una extensa área agrícola que esta suficientemente diferenciada de las áreas desocupadas en lo fundamental por la diferencia entre la cobertura vegetal inducida (agricultura) y su entorno. Finalmente, abajo a la izquierda se aprecia como los cuerpos de agua también son clasificados y se representan en amarillo en la imagen clasificada.

Gráfico 2. Composición RGB (bandas 4,3,2) de la imagen Landsat 2002 y su Clasificación.



Fuente: Elaboración propia

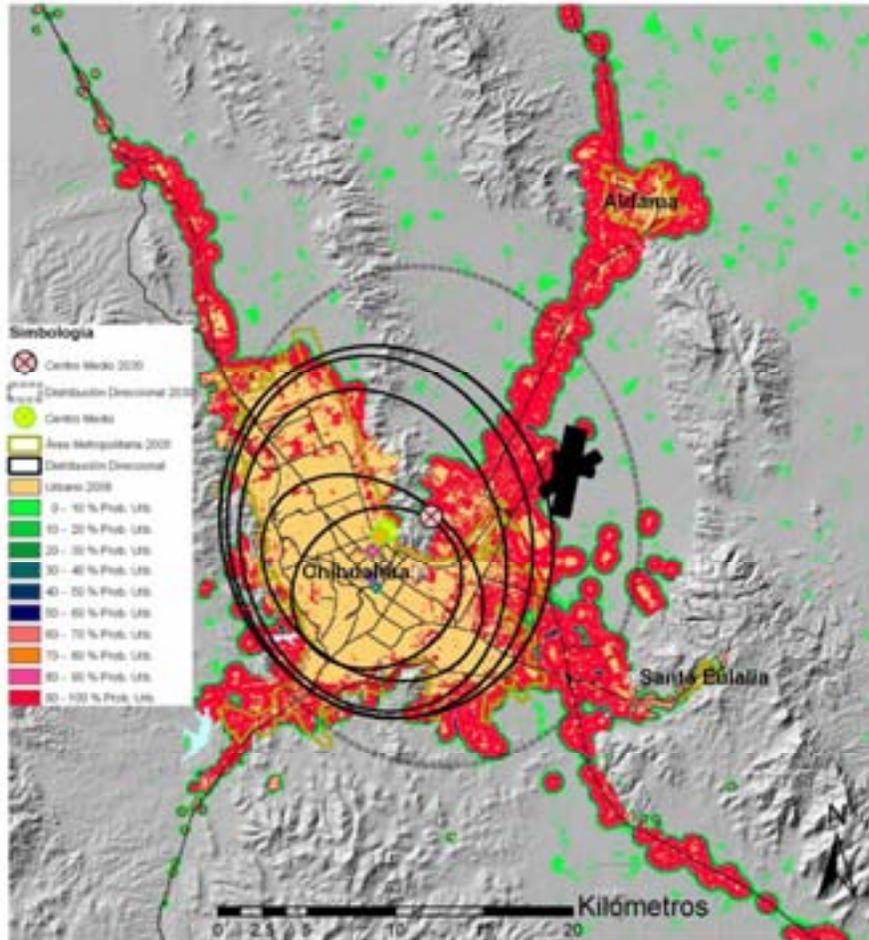
V. Modelación del Crecimiento Urbano de la Ciudad de Chihuahua

La aplicación del modelo SLEUTH parte de un proceso de calibración en el cual la manipulación de los coeficientes permite generar la mejor aproximación al área urbana actual. Esta calibración se genera en tres fases sucesivas: Coarse, Fine y Final (gruesa, fina y final); para ello se utiliza una simulación de Montecarlo donde los valores iniciales de los coeficientes en la fase Coarse se les permite oscilar entre 0 y 100 y se establece un incremento para la generación de los coeficientes de la siguiente iteración. Cada iteración es repetida un número predeterminado de veces y de entre ellas se selecciona la de mejor ajuste para ese valor de los coeficientes, para luego seleccionar los límites del valor de los coeficientes que será utilizado en la siguiente fase.

Las medidas de ajuste a considerar son cuatro (Clarke et. al., 1996), tres de ellas basadas en el coeficiente r^2 que en su caso miden el ajuste entre: el área urbana actual y su predicción, el límite urbano actual y su predicción, y el número de clusters y su predicción. La cuarta medida es el Índice de Forma de Lee-Sallee que es una medida del ajuste espacial entre el modelo y el área urbana para los años de control, su valor resulta de dividir el área de la intersección entre el área de la unión de los resultados de la predicción y el área urbana. Sus valores, al igual que el r^2 , fluctúan entre cero y uno, representando la cercanía a uno el mejor ajuste.

Los resultados del modelo, en virtud de lo dinámico que pueden ser los factores del proceso de crecimiento urbano y que en el mismo sólo se controla a algunos de ellos, condicionan a que su interpretación sea en términos de probabilidades. En el mapa 6 de resultados, se representan la base urbana de la predicción y en una escala de colores las probabilidades de ser urbanos de los espacios o con posibilidades de urbanización.

Mapa 6. Simulación del crecimiento urbano al año 2030 ZMCCH.

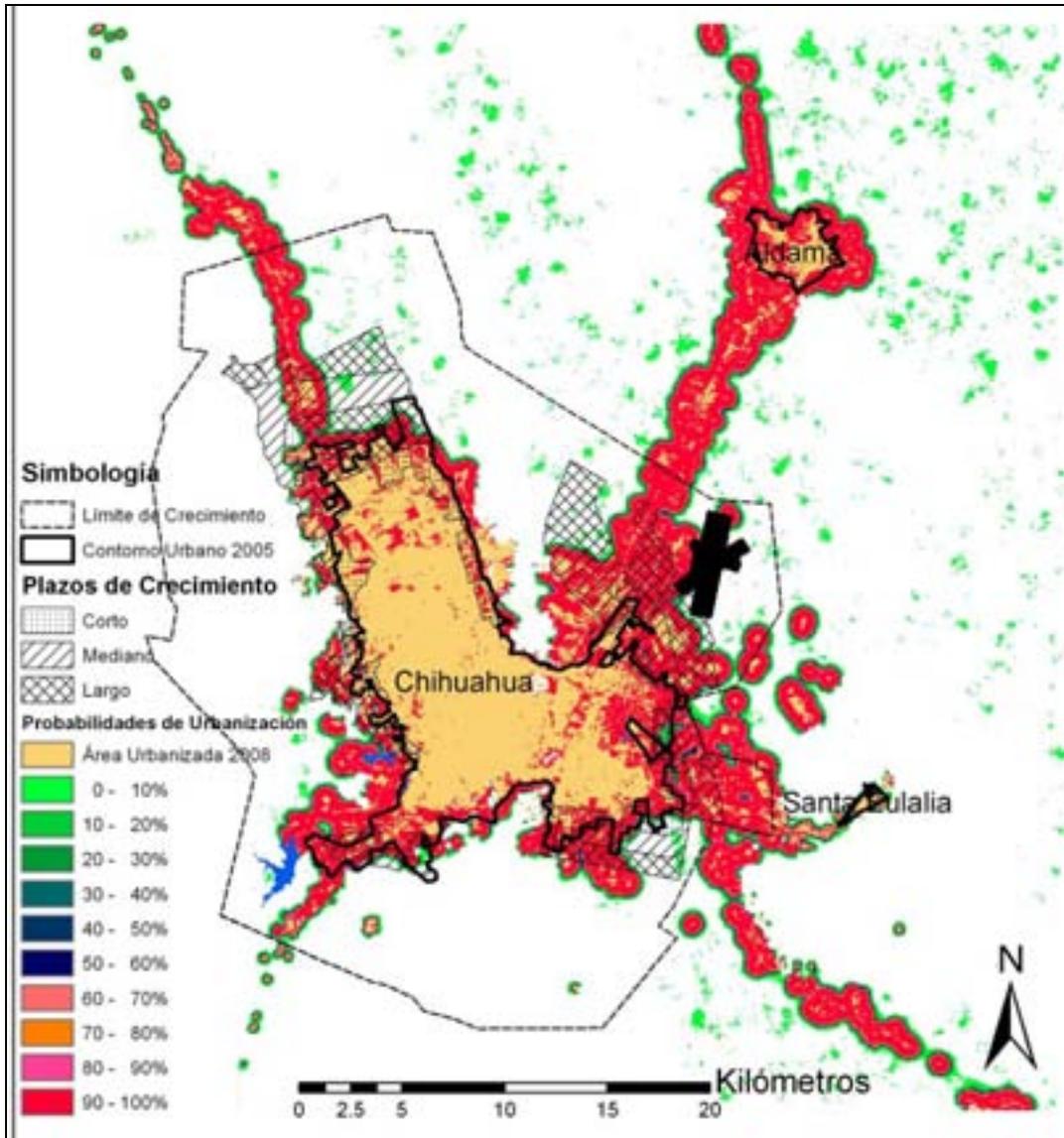


Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo SLEUTH.

Los resultados de la simulación al 2030, muestran que el crecimiento de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Chihuahua (ZMCCH) generada por el modelo sigue la tendencia general del crecimiento urbano de los últimos 35 años (mostrada en el Mapa 6). De la cual se han reproducido aquí solo las estadísticas del centro medio y la dispersión del área urbana y que muestran un desplazamiento de la mancha urbana hacia el norte y hacia el oriente con un mayor dominio al oriente hacia finales del período. En términos de la dispersión de la mancha urbana también se mantiene el patrón detectado en los últimos años, una expansión de la mancha urbana con fuerzas dominantes el oriente. Otro de los elementos significativos es la fuerte correlación del crecimiento con la estructura vial regional, en particular es muy notable la atracción entre los centros urbanos de Chihuahua y Aldama y menor medida el crecimiento sobre la carretera a Ciudad Juárez al Noroeste y a Ciudad Delicias al Sureste. Entre los otros factores del crecimiento urbano como parte de los resultados del modelo destaca el crecimiento

al oriente del centro urbano de Chihuahua, donde para 2008 como se comentó anteriormente, se había detectado el surgimiento de núcleos urbanos relativamente alejados del área urbana y sin conexiones viales, que consideramos la fuente de la expansión urbana en la zona. Finalmente, un elemento a tomar en cuenta como ejercicio de planeación se relaciona al crecimiento al suroeste de la ciudad de Chihuahua, dada la cercanía del mismo con las Presas Chihuahua, El Rejón y Chuiscar y con el río Chuiscar su mecanismo para el control de excedentes.

Mapa 7. Simulación del crecimiento urbano y plazos del Programa de Desarrollo Urbano.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo SLEUTH.

Las relaciones entre los resultados de la simulación al 2030 y los plazos de crecimiento urbano del Programa de Desarrollo Urbano vigente para la ciudad, podemos observar como prácticamente se ha ocupado la totalidad de las áreas destinadas al corto plazo. En cuanto a las áreas a ocuparse a mediano y largo plazo los resultados indican un alejamiento de ese

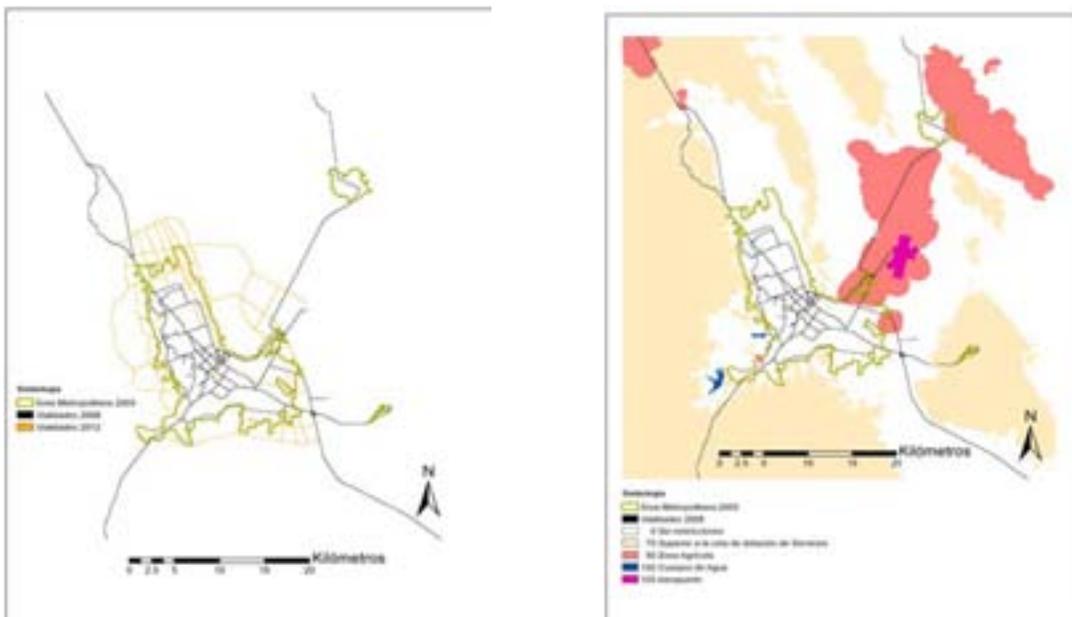
objetivo pues el modelo indica que sólo se ocuparán el 67% del mediano plazo y el 57% del largo plazo. Espacialmente, las reservas al norte de la ciudad tienen muy baja tasa de ocupación, al igual que grandes espacios no urbanizados al norte de la carretera a Aldama cercano al aeropuerto de Chihuahua y al sureste cercano a la carretera a Ciudad Delicias. Lo preocupante de este comportamiento es que gran parte del crecimiento se da entre el límite de los plazos de crecimiento y el límite del centro de población, un área prevista como de protección ecológica a lo que se suma el crecimiento fuera de los límites del centro de población.

VI. Los Escenarios del Crecimiento Urbano de la Ciudad de Chihuahua

El modelo brinda como herramienta de planeación urbana la posibilidad de analizar escenarios alternativos mediante la variación de alguna(s) de las condiciones iniciales del modelo: los valores iniciales de los coeficientes, la base urbana o alguna de las imágenes de entrada del modelo (diagrama 1). En este ejercicio se han considerado dos escenarios: el primero, evalúa el impacto del proyecto de estructura vial planteado en el Programa de Desarrollo Urbano vigente (Construcción de vialidades); el segundo, se centra en los impactos urbanos de limitar totalmente el crecimiento en la zona agrícola de la ZMCCH (Protección Ambiental).

Para la evaluación del impacto de vialidades a futuro se consideró que las propuestas del Plan de Desarrollo Urbano de 1999, actualizado en 2001 y aún vigente en el municipio de Chihuahua se concretaran para el año 2012. Basado en ello se generó un archivo raster que la información de las vialidades propuestas que se incorporó a las imágenes de entrada del modelo, de modo que cuando la simulación alcanzara el año 2012 se comienza a utilizar la estructura vial generada para ese año en lugar de la de 2008 la última disponible.

Mapa 8. Archivos de escenarios de Construcción de Vialidades y de Protección Ambiental.



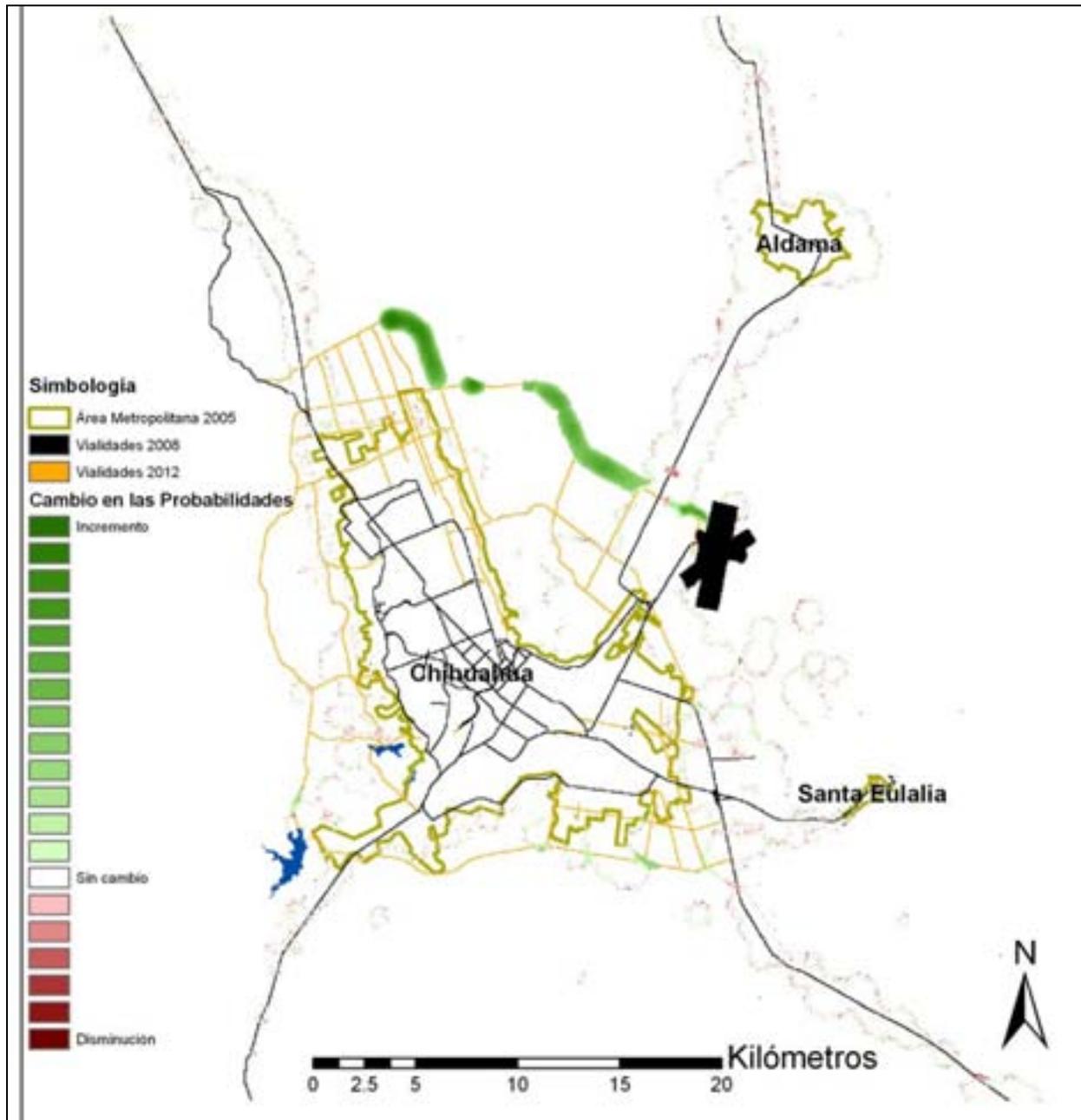
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la zona agrícola el escenario se fundamentó en la protección ambiental dado que el crecimiento reciente de la ciudad se ha dirigido a las zonas agrícolas y las mismas pueden considerarse como un recurso estratégico para la ZMCCH que es necesario preservar a futuro. En este caso el mecanismo de operación del escenario fue la transformación del raster de áreas excluidas, al que se le agregó la zona agrícola con un valor de 50 para frenar en ella la posibilidad de urbanización. En la generación de la zona agrícola del área metropolitana, se determinó que formarían parte de la misma aquellas áreas detectadas como tal en el proceso de clasificación por más de un año de los analizados y que formaran parte de un conglomerado de áreas.

Los resultados del escenario para medir el impacto de la construcción de vialidades en general indica un ligero incremento de las probabilidades de urbanización y de la tasa de crecimiento de la mancha urbana. En el Mapa 9, se muestran los cambios en las probabilidades de urbanización entre el escenario base y el analizado, en el se puede observar como los incrementos en las probabilidades están asociados a las vialidades propuestas que conectan la zona norte de la ciudad con la carretera a Aldama a la altura del aeropuerto de Chihuahua. Otros cambios aunque de menor importancia se ubican al sur de la mancha urbana de Chihuahua en varios segmentos de la conexión propuesta entre la carretera a Cuauhtemoc y a Delicias y uno más al suroeste de la mancha urbana de Chihuahua justo al Norte de la Presa Chihuahua. El resto de los cambios son marginales y se producen en los límites de la urbanización probable descrita para la ZMCCH. Finalmente, se quiere hacer notar que estos cambios refuerzan el desplazamiento al Noroeste de la Mancha Urbana de la ciudad generado en el escenario base y que la dirección del mismo es con rumbo a la zona agrícola del área metropolitana.

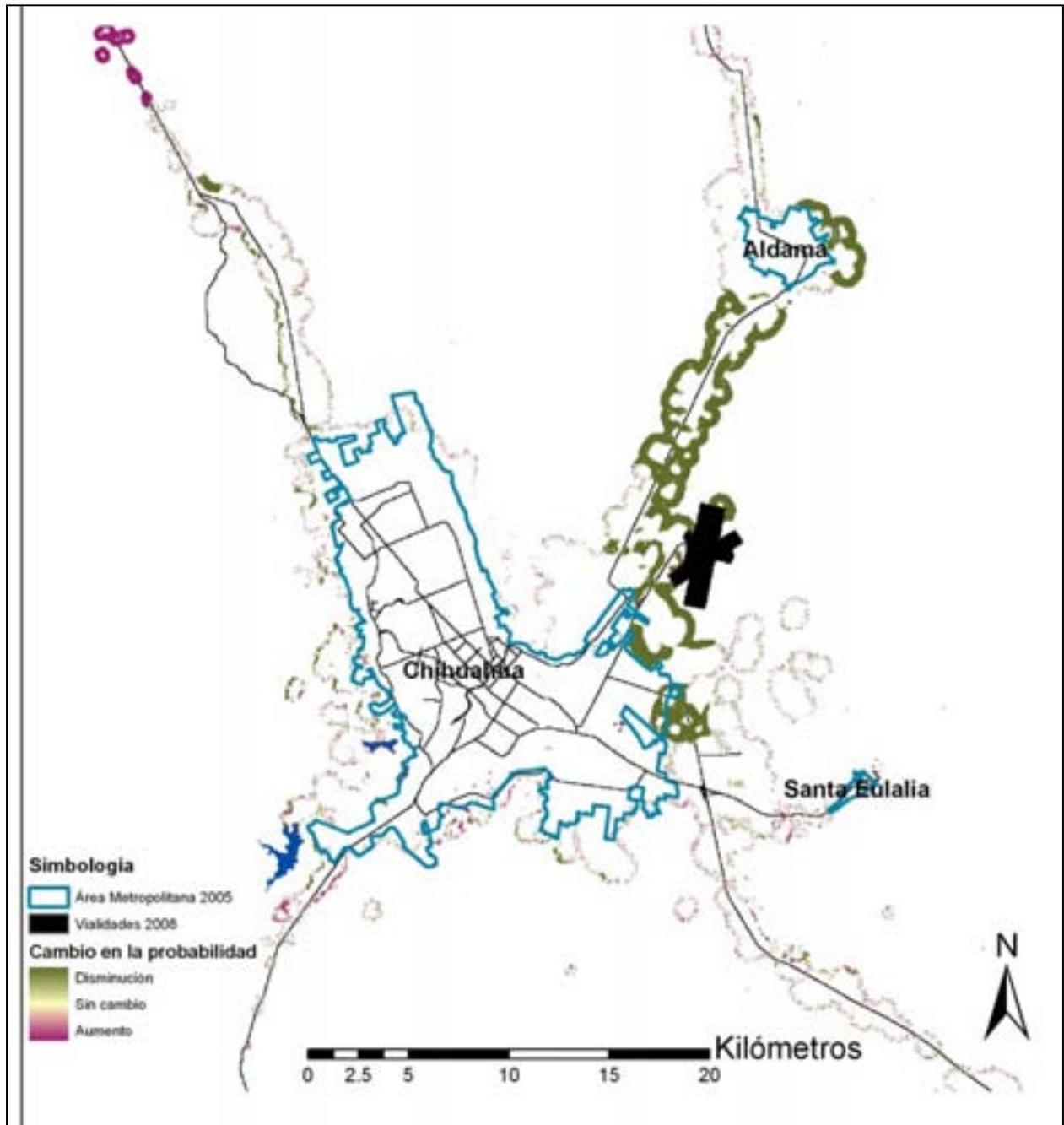
Los resultados del escenario para medir el impacto de la protección ambiental de la zona agrícola de la ZMCCH en general indica una fuerte disminución de las probabilidades de urbanización y de la tasa de crecimiento de la mancha urbana. En el Mapa 10, se muestran los cambios en las probabilidades de urbanización entre el escenario base y el analizado, en el se puede observar como disminuye la probabilidad de urbanización en la zona agrícola en especial la ubicada en la carrera a Aldama y en los alrededores de la misma, también pueden observarse incrementos al norte de Chihuahua sobre la carretera a Ciudad Juárez.

Mapa 9. Cambios en las Probabilidades de urbanización. Comparación del Escenario Base y el de Construcción de Vialidades.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo SLEUTH.

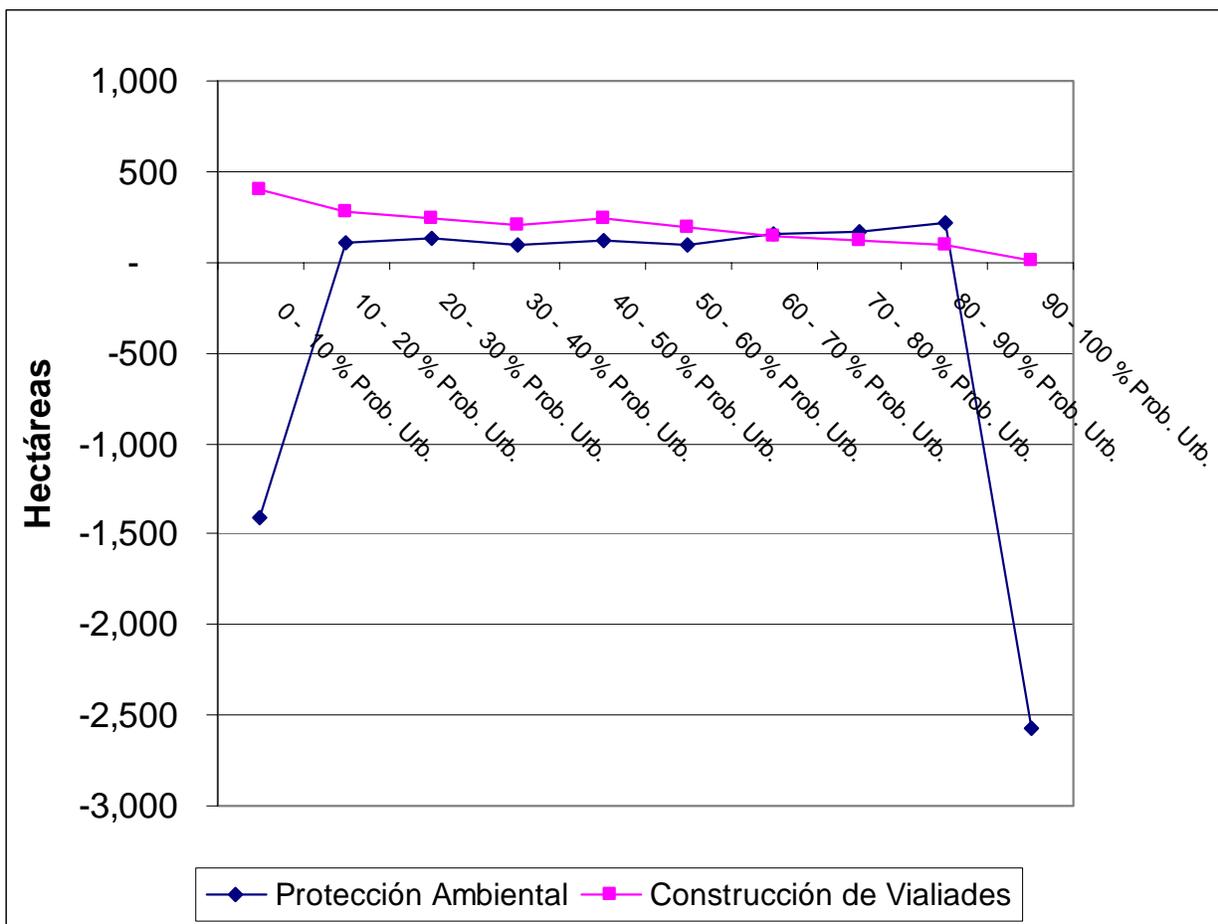
Mapa 10. Cambios en las Probabilidades de urbanización. Comparación del Escenario Base y el de Protección Ambiental.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo SLEUTH.

Los escenarios en general tienen un impacto en el comportamiento de la dinámica urbana pues tal como se mostró, la construcción de vialidades genera un incremento de las probabilidades de urbanización. No obstante, las mayores diferencias se ubican en las áreas con menores probabilidades de urbanización y de manera conjunta las mismas apenas sobrepasan las 1900 ha. (ver gráfica 3). En el caso del escenario de protección ambiental genera una disminución de la demanda de suelo, en particular este es un escenario altamente restrictivo y sobre todo en áreas con las más altas probabilidades de urbanización donde en el segmento de entre 90 y 100% de probabilidad reduce la demanda de 2,500 ha y de manera conjunta la disminución es de casi 2,900 ha. En conjunto, podemos apreciar como las acciones que tomamos tienen un impacto diferenciado en el comportamiento de la dinámica del crecimiento urbano.

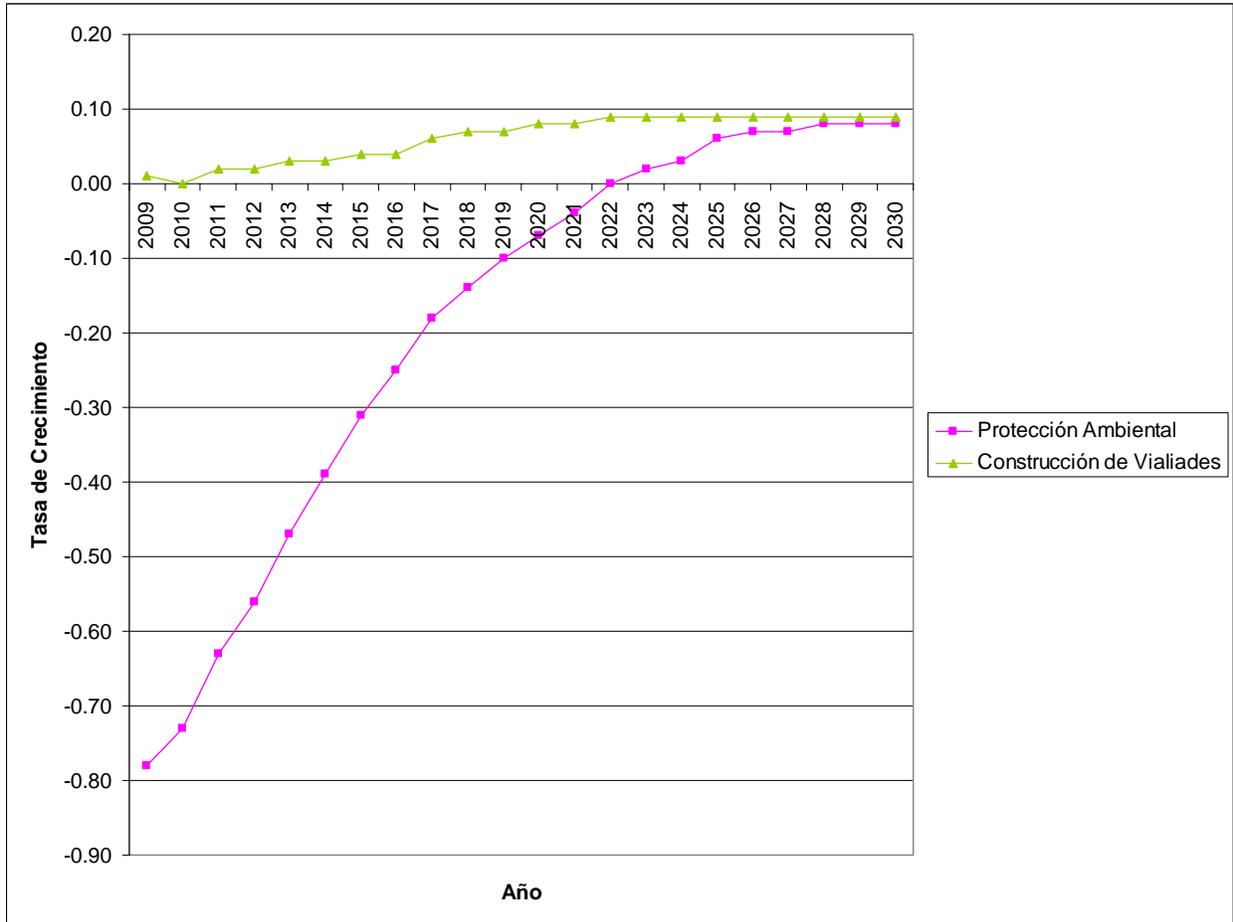
Gráfico 3. Cambios en las necesidades de suelo para urbanización por segmento de probabilidad.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo SLEUTH.

En cuanto al impacto sobre la tasa de crecimiento del área urbana, la comparación de los escenarios considerados en términos de sus diferencias con el modelo base nos muestra como en el caso de la construcción de vialidades el impacto es presionar al crecimiento de la misma a una tasa creciente a lo largo del período analizado. En el caso de la protección ambiental el impacto inicial es una disminución de la misma al inicio del período y que va disminuyendo hacia el final e inclusive es mayor para los años finales del período.

Gráfico 4. Tasa de Crecimiento Urbano AM Chihuahua, Diferencial respecto al Escenario Base.



Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo SLEUTH.

En general, la aplicación de la técnica de modelación del crecimiento urbano como es el caso del modelo celular autómatas para el caso de la ZMCCH demuestra el poder de la misma para poder instrumentar políticas de manejo del suelo urbano. Entre las posibles aplicaciones para el diseño de políticas públicas incluyen analizar el impacto del establecimiento planeado de un núcleo urbano, evaluar el impacto de la adopción de políticas de zonificación del territorio, orientar el crecimiento dirigido por la demanda de agua, etc.

VII. Conclusiones

El modelo de autómatas celulares es una herramienta muy prometedora del modelado urbano, ya que permite desde una aproximación de abajo hacia arriba, fundamentar y diseñar modelos que incluyen procesos de sistemas complejos sobre una base matemáticamente sencilla (Aguilera, 2002). En el contexto, mexicano existen muy pocos avances en esta dirección en el desarrollo de este tipo de herramientas de planeación urbana. Además, son contadas las aplicaciones de autómatas celulares a ciudades específicas.

En el caso de la ZMCCH la aplicación de autómatas celulares para simular la dinámica del crecimiento urbano al año 2030, muestra que el modelo de crecimiento de la ZMCCH sigue la tendencia general del crecimiento urbano de los últimos 35 años. En términos de la dispersión de la mancha urbana también se mantiene el patrón mostrado en los últimos años, una expansión de la mancha urbana con fuerzas dominantes al este. Otros de los elementos significativos es la fuerte correlación del crecimiento con la estructura vial regional y la atracción entre los centros urbanos de Chihuahua y Aldama y menor medida el crecimiento sobre la carretera a Ciudad Juárez al noroeste y a Delicias al sureste.

Entre los otros factores del crecimiento urbano como parte de los resultados del modelo destaca el crecimiento al este del centro urbano de Chihuahua, donde para 2008 como se comentó anteriormente, se había detectado el surgimiento de núcleos urbanos relativamente alejados del área urbana y sin conexiones viales, que consideramos la fuente de la expansión urbana en la zona. Otro elemento a tomar en cuenta como ejercicio de planeación se relaciona al crecimiento al Suroeste de la ciudad de Chihuahua, dada la cercanía del mismo con las Presas Chihuahua, El Rejón y Chuviscar y con el río Chuviscar su mecanismo para el control de excedentes.

El uso del modelo celular autómata permite la generación de escenarios alternos con los que se puede prever el impacto de determinadas políticas urbanas. En el caso de la ZMCCH un primer escenario a evaluar fue el impacto de la construcción de nuevas vialidades. Los resultados muestran un ligero incremento de las probabilidades de urbanización y de la tasa de crecimiento de la mancha urbana. Por su parte, el escenario para medir el impacto de la protección ambiental de la zona agrícola de la ZMCCH, muestra una fuerte disminución de las probabilidades de urbanización y de la tasa de crecimiento de la mancha urbana.

Entre las posibilidades de la aplicación como herramienta para la planeación urbana destacan las posibilidades de analizar la influencia en la dinámica urbana de núcleos urbanos, modelar los impactos en el crecimiento del establecimiento de políticas de ordenamiento y zonificación, las posibilidades para simular la orientación del crecimiento urbano dirigido por la disponibilidad de agua, por la dinámica de los centros de empleo industrial o por criterios de protección ambiental.

Bibliografía

- Aguilera, Antonio, 2002. Ciudades Como Tableros de Ajedrez. Introducción al Modelado de Dinámicas Urbanas con Automatas Celulares. El Colegio de San Luis.
- Batty M. (1994) A chronicle of scientific planning: the Anglo-American modeling experience. *Journal of the American Planning Association* 60: 7–16.
- Batty, M. & Densham, P. (1996) Decision support, GIS and urban planning. *Sistema Terra*, Vol. V No.1, pp.72–6.
- Clarke, K.C., and Gaydos, L. (1998) Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographic Information Science* 12: 699–714.
- Clarke, K.C., Hoppen, S. and Gaydos, L. (1996). Methods And Techniques for Rigorous Calibration of a Cellular Automaton Model of Urban Growth. Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling; 1996 Jan 21-25; Santa Fe, New Mexico.
- Clarke, K.C., Hoppen, S. and Gaydos, L. (1997) A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B* 24:247–261.
- Couclelis, Helen (1997). From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24, no. 2: 165–74.
- Engelen, G., White, R. and Uljee, I. (1997) Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban planning and policy-making, in Timmermans H. (ed.), *Decision Support Systems in Urban Planning*, London: E&FN Spon, pp. 125–155.
- Engelen, G., White, R., Uljee, I. and Drazan, P., (1995) Using cellular automata for integrated modelling of socio-environmental systems. *Environ. Monitor. Assess.*, 34, 203–214.
- Fuentes, César M (2007). “Evaluación de la Factibilidad de Densificación Urbana” en Córdoba (coord.). *Estudio del Espacio Urbano en Chihuahua, Chihuahua: Una Evaluación de la Vivienda y los Barrios Tradicionales, Equipamiento y de la Factibilidad de Densificación Urbana*. COLEF-IMPLAN.
- Itami, R. M. (1994) Simulating Spatial Dynamics: Cellular Automata Theory. *Landscape and Urban Planning* 30, pps. 27–47.
- Landis, J. y M. Reilly (2003). “How We Will Grow: Baseline Projections of the Growth of California’s Urban Footprint through the Year 2100”, documento de trabajo, Berkeley, Institute of Urban and Regional Development, University of California.
- Leao, S.Z., Bishop, I.D., & Evans, D. (2004) Simulating Urban Growth in a Developing Nation's Region Using a Cellular Automata-Based Model, *Journal of Urban Planning and Development* 130, 145–158.

- Lee, D. (1994) Retrospective on large scale urban models, *Journal of the American Planning Association*, 60, 35–40.
- Lee, Douglass B., Jr. (1973) Requiem for Large-Scale Models. *Journal of the American Institute of Planners* 39, 3: 163–78
- Li, X. and Yeh, A. G. O. (2000) Modelling sustainable urban forms by the integration of constrained cellular automata and GIS, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 14, No. 2, 131–152.
- Lowry, Ira S. (1964) A Model of Metropolis RAND Memorandum 4025-RC.
- Oğuz, Hakam (2004). Modeling urban growth and land use/land cover change in the Houston Metropolitan Area from 2002-2030. Dissertation, Doctor of Philosophy, Texas A&M University.
- Owens, S. E. (1992): “Energy, Environmental Sustainability and Land-use Planning”, en: Breheny, M. (ed.): *Sustainable Development and Urban Form*, Pion, Londres, pp.79–105.
- Peña, Sergio y Fuentes, César M. (2007). “Land Use Changes in Ciudad Juárez, Chihuahua: A Systems Dynamic Model”, *Estudios Fronterizos. Nueva Época*, vol. 8, núm.16 , Julio-Diciembre 65–89.
- SEDESOL, CONAPO, INEGI (2007). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005.
- Suarez, Manuel y Delgado, Javier. (2007). “La expansión urbana en la Ciudad de México. Un escenario pesimista y dos alternativas para el año 2020”, *Estudios Demográficos y Urbanos*, Vol. 22, Núm. 1, 101-142.
- USGS, Gigalipolis project: Urban and Land Cover Modeling
<http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/qig/project_qig.htm>
- Wegener, M. (1994) Operational urban models: state of the art, *Journal of the American Planning Association* 59 17–29
- White, R. and Engelen, G. (1993) Cellular Automata and Fractal Urban Form: A Cellular Modeling Approach to the Evolution of Urban Land Use Patterns, *Environment and Planning A*, 25, 1175–1199.
- White, R. and Engelen, G. (1994) Cellular dynamics and GIS: modelling spatial complexity, *Geographical Systems*, Vol. 1, pp. 237-253.
- White, R. and Engelen, G. (1997) Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling, *Environment and Planning B*, Vol.24, pp. 235–246.
- White, R., Engelen, G. and Ujje, I. (1997) The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics, *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 24, 323-343.