



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Simulación dinámica del crecimiento urbano. Caso de estudio:
Zona Metropolitana de Querétaro

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta
Manuel Fernando Chavira Quiñonez

Dirigido por:
M.en I. Gerardo Ríos Quezada

Co-dirigido por:
Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

M. en I. Gerardo Ríos Quezada
Presidente

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Secretario

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Vocal

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Suplente

M. en I. Marco Luis Dorado Pineda
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Noviembre 2019
México

Dirección General de Bibliotecas UAQ

DEDICATORIAS

A mi pareja, familia, amigos, compañeros de maestría y demás personas que me apoyaron de forma incondicional durante el tiempo de la elaboración de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que conocí en Querétaro y que me brindaron su ayuda de alguna manera.

A mis maestros que me ayudaron a seguir forjando mi carrera en esta maestría, en especial a mi director de tesis por sus consejos y revisiones.

A mis compañeros de maestría por la convivencia y la oportunidad de conocerlos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por darme el sustento económico para lograr esta investigación.

Dirección General de Bibliotecas UJAQ

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	2
2. ANTECEDENTES	4
3. HIPÓTESIS	18
4. OBJETIVOS	18
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
4.2 OBJETIVOS PARTICULARES	18
5. MARCO TEÓRICO.....	19
5.1 EL FENÓMENO URBANO Y METROPOLIZACIÓN	19
5.1.1 <i>Metropolización</i>	19
5.1.1.1 Criterios para delimitación de zonas metropolitanas.....	21
5.1.2 <i>Patrones de desarrollo de las ciudades</i>	24
5.1.2.1 Características de ciudades en países desarrollados.....	24
5.1.2.2 Características de ciudades en países en desarrollo	25
5.1.3 <i>Ciudades medias</i>	26
5.1.4 <i>Planeación urbana</i>	27
5.1.5 <i>Zona Metropolitana de Querétaro</i>	27
5.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) EN ESTUDIOS URBANOS.....	28
5.2.1 <i>Funcionamiento</i>	29
5.2.2 <i>Representación de datos</i>	30
5.2.2.1 Raster	30
5.2.2.2 Vectorial	31
5.2.3 <i>Sistemas de coordenadas y proyecciones cartográficas</i>	32
5.2.4 <i>Análisis espacial</i>	33
5.2.5 <i>Software SIG</i>	34
5.2.6 <i>Plataforma QGis</i>	35

5.2.6.1	Plugin MOLUSCE	35
5.3	MODELACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO	36
5.3.1	<i>El modelado del crecimiento urbano y las vías terrestres</i>	37
5.3.2	<i>Simulación dinámica</i>	39
5.3.2.1	Matriz de transición de Markov	41
5.3.2.2	Pesos de evidencia (WoE).....	42
5.3.3	<i>Autómata celular</i>	43
5.3.4	<i>Variables inducidas en los modelos</i>	44
5.3.4.1	Coeficiente de correlación de Pearson.....	45
5.3.5	<i>Validación de modelos</i>	46
5.3.5.1	Coeficiente Kappa (K)	46
6.	METODOLOGÍA	48
6.1	DIAGRAMA DE METODOLOGÍA	48
6.2	REVISIÓN DE LA LITERATURA Y DESARROLLO DEL MARCO TEÓRICO.	48
6.3	DESARROLLO DEL DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.	49
6.3.1	<i>Definición del modelo utilizado, a partir de la Tabla 2.1.</i>	49
6.3.2	<i>Definición del área de estudio.</i>	49
6.3.3	<i>Búsqueda y fijación de las variables que se involucran en el objeto de estudio.</i>	51
6.3.4	<i>Establecimiento del software a emplear</i>	52
6.3.5	<i>Establecimiento del periodo de medición o de estudio</i>	52
6.4	ADQUISICIÓN DE DATOS.....	52
6.4.1	<i>Uso de suelo.</i>	52
6.4.2	<i>Áreas naturales protegidas</i>	54
6.4.3	<i>Pendiente del suelo</i>	55
6.4.1	<i>Densidad de población</i>	57
6.4.2	<i>Tiempo de viaje del centro a la periferia</i>	58
6.4.3	<i>Red vial</i>	59
6.4.4	<i>Costo del suelo</i>	60
6.5	MODELACIÓN	60
6.5.1	<i>Fijación de parámetros de entrada</i>	60
6.5.2	<i>Evaluación de correlación de variables</i>	61
6.5.3	<i>Análisis de cambio de uso de suelo</i>	62

6.5.4	<i>Modelación de potencial de transición</i>	62
6.5.5	<i>Simulación</i>	63
6.5.6	<i>Validación</i>	63
6.5.7	<i>Generación de pronósticos faltantes</i>	63
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
7.1	EVALUACIÓN DE CORRELACIÓN DE VARIABLES.....	64
7.2	CAMBIO DE USO DE SUELO DE 2003 A 2010	65
7.3	MODELADO DE POTENCIAL DE TRANSICIÓN	68
7.4	SIMULACIÓN.....	69
7.5	TENDENCIA DEL CRECIMIENTO URBANO.....	72
7.6	VALIDACIÓN	75
7.7	RESULTADOS CON CAMBIO DE MAGNITUDES DE VARIABLES.....	76
8.	CONCLUSIONES	79
9.	REFERENCIAS	82

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparación de estudios de simulación de crecimiento urbano.	11
Tabla 5.1 Criterios para delimitar zonas metropolitanas.	21
Tabla 6.1 Factores de crecimiento urbano para evaluar en modelos de simulación.	50
Tabla 6.2 Tabla de rangos para categorización de variables.....	62
Tabla 7.1 Correlación de Pearson entre las variables espaciales	64
Tabla 7.2 Distribución y cambio de área de tipo de uso de suelo 2003 y 2010.	65
Tabla 7.3 Matriz de transición de cambio de uso de suelo entre 2003 y 2010	67
Tabla 7.4 Tabla de rangos para categorización de variables.....	69
Tabla 7.5 Parámetros de validación del modelo	75
Tabla 7.6 Resultados de experimentos.....	77

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.1. Esquema básico de los procesos de urbanización.	20
Figura 5.2. Proceso de modelación dinámica de sistemas.	40
Figura 6.1 Diagrama metodológico.	48
Figura 6.2 Zona Metropolitana de Querétaro.	51
Figura 6.3 Distribución de uso de suelo en 2003.	53
Figura 6.4 Distribución de uso de suelo en 2010.	54
Figura 6.5 Áreas naturales protegidas.	55
Figura 6.6 Distribución de pendientes.	56
Figura 6.7 Distribución de densidad poblacional.	57
Figura 6.8 Isocronas de tiempo a cada 5 minutos.	58
Figura 6.9 Red vial de la ZMQ.	59
Figura 6.10 Distribución del costo de suelo de suelo por AGEB.	61
Figura 7.1 Cambio de uso / cobertura del suelo de 2003 a 2010.	66
Figura 7.2 Cambio de área entre 2003 y 2010.	68
Figura 7.3 Composición del uso de suelo para el año pronosticado 2017.	70
Figura 7.4 Mapa de confiabilidad.	71
Figura 7.5 Histograma de mapa de confiabilidad.	71
Figura 7.6 Mapa de simulación para el año 2017.	72
Figura 7.7 Crecimiento urbano histórico y predicho.	73

Figura 7.8 Crecimiento urbano sobrepuesto.....74

Figura 7.9 Crecimiento del área urbana de la ZMQ.....75

Figura 7.10 Mapa de uso de suelo año 2017.....76

Dirección General de Bibliotecas UAQ

RESUMEN

Con el inicio de la expansión de ciudades en el siglo XX surgieron las primeras preocupaciones por planificar y estudiar el desarrollo urbano, por lo que se han realizado evaluaciones del crecimiento urbano desde entonces. Actualmente con ayuda de Sistemas de Información Geográfica, se han logrado modelos predictivos más acertados, sin embargo, los modelos desarrollados actualmente, omiten, en la mayoría de las ocasiones, los parámetros indicadores de la situación presente en la zona de estudio. Debido a ello la presente investigación se centra en reforzar un modelo que exprese el patrón de crecimiento de la Zona Metropolitana de Querétaro mediante variables que estén íntimamente ligadas con la expansión urbana para simular el crecimiento urbano. La metodología consistió en utilizar Sistemas de Información Geográfica para procesar las variables de uso de suelo, áreas naturales protegidas, cuerpos de agua, pendiente del suelo, red vial, costo del suelo, densidad poblacional y tiempos de traslado del centro a la periferia, en un modelo que permitiera pronosticar el crecimiento urbano de la zona de estudio a 20 años, generando mapas a cada 5. El modelo validado indica un 91.34% de aceptación, por lo que fue apto para generar los pronósticos. Los resultados indican que las zonas hacia donde crecerá la ciudad son al Oeste en el área plana del municipio de Corregidora y el área de Cerrito Colorado en el municipio de Querétaro, al Norte entre Jurica y Juriquilla en el municipio de Querétaro, al Este en la zona Milenio-Mirador y Pradera-refugio en el municipio de El Marqués, al Sur en el área de Candiles y libramiento Sur-Poniente.

(Palabras clave: expansión urbana, Sistemas de Información Geográfica, uso de suelo, simulación, modelos)

ABSTRACT

Since the beginning of expansion of cities in the twentieth century, the first concerns arose to plan and study urban development, so urban growth evaluations have been carried out since then, currently with help of Geographic Information Systems, thus achieving predictive models more successful, however, the models currently developed, omit, in most cases, the parameters indicating the situation present in the study area. Because of this, this research focuses on strengthening a model that expresses the growth pattern of the Metropolitan Area of Querétaro through variables that are closely linked to urban expansion to simulate urban growth. The methodology consisted of using Geographic Information Systems to process the variables of land use, protected natural areas, water bodies, slope, road network, cost of land, population density and travel time from the center to the out, in a model that allowed to predict the urban growth of the study area to 20 years, generating maps every 5. The validated model indicates a 91.34% acceptance, so it was apt to generate the forecasts. The results indicate that the areas where the city will grow are to the west in the flat area of the municipality of Corregidora and the area of Cerrito Colorado in the municipality of Querétaro, north between Jurica and Juriquilla in the municipality of Querétaro, east in the Milenio-Mirador and Pradera-Refugio area in the municipality of El Marqués, to the south in the area of Candiles and south-west beltway.

(Key words: urban expansion, Geographic Information Systems, land use, simulation, models)

1. INTRODUCCIÓN

La población en la mayoría de los países, cada vez más vive en zonas urbanas; en México no es la excepción, donde la migración del campo a la ciudad o de ciudades pequeñas a las de mayor tamaño ha provocado el crecimiento de grandes urbes, de hecho, algunas han alcanzado enormes proporciones que sobrepasan los límites de división política municipal y estatal (INEGI *et al.*, 2015). El crecimiento descontrolado que casi siempre se da, implica grandes desafíos en términos de provisión de servicios como transporte público, vivienda, empleo y el cuidado del medio ambiente, entre otros. Es por ello que ésta problemática ha impulsado el análisis del fenómeno.

El estudio del crecimiento urbano, encuentra cada día nuevos retos debido a los impactos ambientales, sociales, económicos y culturales que comprenden los procesos de urbanización (Cifuentes, 2009). La simulación de patrones espaciales urbanos futuros pueden proveer elementos sobre cómo nuestras ciudades se desarrollan bajo múltiples condiciones sociales, económicas y ambientales (Clarke *et al.*, 1997). Diferentes modelos se han utilizado para simular distintos tipos de formas urbanas y de desarrollo, así como para investigar la evolución de la estructura espacial urbana en el tiempo.

Un caso representativo de ciudad que expone rápido crecimiento en México es la Zona Metropolitana de Querétaro, la cual, debido a su gran auge económico y buen nivel de vida ha sido una gran atractora de empleo, provocando así que mucha gente del país decida mudarse hacia Querétaro (Villar, 2017), provocando un crecimiento descontrolado de la mancha urbana. Es por ello que la Zona Metropolitana de Querétaro es objeto de estudio para reforzar y evaluar un modelo que prediga de manera acertada el crecimiento urbano.

El modelo a utilizar es el de simulación dinámica, el cual pretende comprender la continuidad del desarrollo histórico de una aglomeración urbana, predecir su evolución futura, simular su condición de expansión y encontrar sus ventajas y

desventajas. Se involucraron variables que interactúan directamente como factores del crecimiento urbano y que en estudios similares ya realizados no se han tomado en cuenta. Algunas de las variables a utilizar serán el uso de suelo, crecimiento histórico, áreas naturales protegidas, tiempos de viaje, relieve, áreas industriales, vialidades, entre otros factores.

1.1 Planteamiento del problema

La urbanización es uno de los cambios globales más evidentes. La investigación en el campo del modelado del crecimiento urbano ha generado investigaciones que exploran los factores y componentes de la dinámica del crecimiento urbano, sin embargo, los modelos desarrollados omiten en la mayoría de las ocasiones los parámetros indicadores de la situación actual de la zona de estudio.

La complejidad de los sistemas urbanos dificulta abordar adecuadamente sus cambios utilizando un modelo basado en un enfoque único.

Por lo tanto, el uso de modelos dinámico-espaciales de crecimiento urbano en regiones de países en desarrollo podría ser un medio para ayudar a los planificadores de estas regiones a comprender y simular el proceso de crecimiento urbano y probar los resultados en diferentes estrategias de desarrollo. Cabe mencionar que el patrón de crecimiento de las regiones urbanas de las naciones en desarrollo, es diferente al de los países desarrollados.

1.2 Justificación

Santé *et al.* (2010) indican que la investigación adicional en el área de modelación de crecimiento urbano implicaría el desarrollo de nuevos métodos de validación, basados en el reconocimiento de patrones urbanos, y la exploración del potencial de los métodos para la integración con otras teorías geográficas y urbanas convencionales. Por su parte, Torrens y Benenson (2005) concuerdan en que, al integrar modelos con otras técnicas, como sistemas de agentes múltiples o

modelos de transporte, podrían obtenerse modelos híbridos que superen algunas deficiencias.

La evolución de las ciudades ha prestado la atención en muchos campos, entre ellos el crecimiento desordenado, debido a ello Wu *et al.* (2016) proponen un modelo de expansión de la mancha urbana para relacionar la evolución de la población y el crecimiento de las vialidades, sin embargo, su modelo carece de factores determinantes para una modelación apegada a la realidad. La simulación y la predicción del crecimiento urbano pueden contribuir con un aporte clave a muchos modelos ambientales y de planificación.

Por consiguiente, los modelos de expansión urbana podrían utilizarse en los planes espaciales, las estrategias de desarrollo y las políticas de reforma de las aglomeraciones urbanas en los países en desarrollo, a su vez que podrían utilizarse en la predicción de desarrollos, la evaluación de las tendencias de expansión y el estudio histórico urbano (Zheng, 2014).

2. ANTECEDENTES

Como fenómeno del siglo XX, la expansión de las ciudades, en especial las más grandes y con mayores tasas de crecimiento, generó mucho interés. El siglo XXI marca un punto de inflexión global. Después de su protagonismo desde la revolución industrial, las ciudades ahora concentran la mayoría de la población mundial y según Azócar *et al.* (2003) se espera que esta tendencia siga.

Para el planificador urbano Británico Howard E. (1898) una ciudad libre de barrios bajos o mal planificados permite disfrutar los beneficios de la urbe (oportunidad de empleo, diversión y altos salarios) y del país (belleza, calidad de aire y rentas bajas), de esta manera, ilustró la idea con su diagrama “Tres imanes” en la que explicaba la relación que debería existir entre la población, la zona urbana y el país. Sus ideas fueron concebidas para el contexto de un sistema económico capitalista, y buscaban equilibrar las necesidades individuales y comunitarias. Y a partir de su esquema los estudiosos han puesto atención en el fenómeno de la policentricidad, por ello Adolphson (2009) argumenta que en general, el sistema urbano se considera en términos de diferentes tipos de actividades sociales.

La estructura policéntrica intraurbana fue conceptualizada por primera vez en la década de 1940 por Harris y Ullman (1945) quienes argumentaron que la ciudad se expande alrededor de varios centros de actividades económicas.

Kevin Lynch (1960) describe algunos términos de estructura urbana espacial fundamentada en los elementos visuales. Sus estudios se centraron en mapear la ciudad en zonas funcionales, por ejemplo, en áreas residenciales o industriales, áreas dependiendo sus características económicas y estéticas, entre otros. Se hace el supuesto de que dichas zonas funcionales tienen gran influencia en el comportamiento de las personas dentro de la ciudad, como son sus desplazamientos, sus rutas, y, sobre todo, donde deciden vivir y trabajar. Dicho

comportamiento afecta la evolución de la estructura espacial, en otras palabras, para White *et al.* (2015) es el proceso de auto-organización.

Antes del advenimiento de la era tecnológica, cuando aún era muy difícil tener acceso a los sistemas computacionales, la modelación espacial urbana partía de las ciencias descriptivas, aunque ocasionalmente incluyeron un componente evolutivo o modelos estáticos simples. Un problema adicional era que los datos específicos de la ubicación no estaban disponibles (White *et al.*, 2015).

Un modelo matemático adecuado para modelar sistemas naturales que pueden ser descritos como una colección masiva de objetos simples que interactúan localmente unos con otros fue desarrollado por John Von Neumann (1966) y se le nombró Autómata Celular. El modelo ha sido adaptado a diferentes condiciones técnicas según sea el propósito de estudio.

Bernard Rouleau (1967), reporta un estudio sobre la red de calles de París, su enfoque era bastante diferente de los modelos dinámicos, por lo cual lo convertía sustancialmente diferente al centrarse en el patrón que seguían las calles y no en otras características como el uso de suelo y distribución socioeconómica.

Por otro lado, el tamaño (basado en la población y el empleo) y la distribución de las ciudades han sido descritos por Rosen y Resnick (1979) mediante la distribución de Pareto (o la regla de tamaño de rango de Zipf), también utilizaron dos medidas de mayor importancia para describir el dominio de la ciudad principal.

Shimou (1992) presentó una investigación sobre la estructura espacial de las aglomeraciones urbanas en los países en desarrollo de Asia. Propuso que las ciudades en dichas aglomeraciones a menudo mantienen la distancia en el espacio; las grandes, medias y pequeñas se distribuyen según ciertas reglas, y propuso que, si se podía estudiar la estructura espacial de las aglomeraciones urbanas, se podría comprender la tendencia general de desarrollo de las mismas.

La investigación sobre el modelado urbano intentó construir modelos urbanos a gran escala, mismos que Lee (1994) definió como modelos que buscan describir en una forma funcional y estructural toda un área urbana, en términos espaciales, terrestres, uso de suelo, demografía y economía. Esa misma visión ha sido la de McGarigal y Marks (1995) ya que propusieron un modelo que consiste en cuadrículas, las cuales como unidad se le asignan información funcional y estructural a gran escala. Es el método clásico que puede utilizarse para la investigación de aglomeraciones urbanas. Muchos académicos han establecido su método de análisis sobre esta base.

La estructura espacial urbana comenzó a formar parte de los estudios de crecimiento y ordenamiento territorial. Bajo ésta premisa, Anas *et al.* (1998) enfocan su investigación en explicar la estructura espacial urbana como resultado de los procesos de mercado, también abordan dos temas relacionados entre sí. El primero se refiere al papel del gobierno, la política gubernamental (sobre todo el control del uso del suelo y la provisión de infraestructura de transporte) ya que desempeña un papel importante en la configuración de las ciudades y el segundo problema se refiere a la importancia de la economía.

En otro aspecto, hace varios años que se han explorado las posibilidades del modelado del uso de suelo basado en Autómata Celular en el contexto de las zonas urbanas con rápido crecimiento en China, bajo este contexto Li y Yeh (2000) crearon un modelo para los aspectos de planificación urbana, el cual se centra en la mejora de los parámetros que intervienen en el algoritmo de Autómata Celular y que facilitan su interpretación.

Husein *et al.* (2000) presentaron el método de la curva relacional, el cual podía medir la relación entre la distribución de las áreas con mayor densidad de edificaciones, la distancia entre ellas y al centro de la ciudad. Sin embargo, nueve años más tarde, Adolphson (2009) propuso dos métodos más sofisticados, el

método de determinación de cuadrícula y el método multiparámetro, para mejorar el método de celdas en cuadrícula para el estudio de aglomeraciones urbanas.

La inquietud por entender el fenómeno del crecimiento urbano llevó a Chin (2002) a realizar una investigación, en la cual, resume cuatro fases del crecimiento:

- La primera es crecimiento rápido en el centro de la ciudad, normalmente llamada urbanización. En su opinión, el crecimiento de las ciudades creó núcleos congestionados, con hacinamiento y viviendas de mala calidad. Esto se convirtió en un factor que empujó a la población hacia afuera.
- La segunda fase la llamó sub-urbanización, indicando el crecimiento más rápido fuera del núcleo de la ciudad. El progreso tecnológico y económico creó una mayor fluidez en la población, elevando el nivel de vida y aumentando las demandas espaciales de los habitantes.
- La tercera fase es la urbanización contraria, con población en el centro y los suburbios que se trasladan a áreas rurales.
- Por último, describe la cuarta fase como la reurbanización, con un aumento de la población en el centro de la ciudad.

De este modo Leao *et al.* (2004) deducen que el fenómeno de expansión urbana experimentado en la mayoría de las naciones desarrolladas caería en la tercera fase de crecimiento. Sin embargo, en las regiones urbanas de las naciones en desarrollo, debido a su movilidad limitada y su menor nivel de vida, el proceso actual de crecimiento urbano encajaría mejor en la segunda fase del crecimiento.

Retornando a la temática de densidad de construcción y a los centros de las zonas urbanas, Davoudi (2003) describe el modelo de ciudad monocéntrico con un centro aparente, el modelo de ciudad policéntrico con varios centros aparentes y el modelo de ciudad dispersa sin centro aparente. Respecto a la relación entre las zonas urbanas cercanas, The European Spatial Planning Observation Network

(ESPO, 2005) combinó parámetros de tamaño, ubicación y conectividad para formular un índice policéntrico sobre la estructura interurbana dentro de la Unión Europea. El índice de tamaño combinó la distribución de Pareto y el índice de Gini junto con una regresión sobre el ingreso económico y el rango de las ciudades. La conectividad entre las ciudades se investigó de acuerdo con la relación de cada ciudad con la accesibilidad general en la región.

Por consiguiente, Barthélemy y Flammini (2009) estudiaron la influencia que la densidad de población y la red vial tienen en el crecimiento y la evolución de las zonas urbanas. Utilizaron un modelo simple de formación y evolución de las vías de la ciudad que reproduce las características empíricas más importantes de las redes de calles en las ciudades.

Dentro de este marco, presentaron explícitamente la topología de la red de calles y analizaron cómo evoluciona e interactúa con el desarrollo de la densidad de población. Encontraron que los problemas de accesibilidad que empujan a las personas a acercarse a nodos de gran centralidad, conduciendo de esta manera, a la aparición de centros densamente poblados. Por su parte, Kim (2009) propuso el cálculo del espacio con ejes y nodos que podrían describir la estructura espacial de una aglomeración urbana, de esta manera abordó la espacialidad para estudiar la densidad de una ciudad.

Los modelos basados en Autómata Celular representaban la mayoría de los estudios realizados para predicción de crecimiento urbano, en ese contexto, Santé *et al.* (2010) realizaron una investigación con el fin de proporcionar una revisión de los modelos urbanos aplicados a casos reales, junto con un análisis de sus capacidades y limitaciones. La revisión y clasificación de los modelos basados en Autómata Celular se llevó a cabo estudiando sus principales características y ha permitido el análisis de sus fortalezas y debilidades.

Seto *et al.* (2011) señalan que la conversión de la superficie terrestre a usos urbanos es uno de los impactos humanos más irreversibles en la biosfera mundial. Para justificar lo anterior, presentaron un metanálisis de 326 estudios utilizando imágenes obtenidas por teledetección para mapear la conversión de tierras urbanas. En todas las regiones y durante las tres décadas, las tasas de expansión del uso de suelo urbano son más altas o iguales a las tasas de crecimiento de la población urbana, lo que sugiere que el crecimiento urbano es cada vez más expansivo que compacto. En los países de altos ingresos, las tasas de expansión del suelo de uso urbano son más lentas y están cada vez más relacionadas con el crecimiento del PIB.

En este contexto Zeng *et al.* (2015) concuerdan en que la expansión urbana ha provocado problemas ambientales y grandes pérdidas de tierra cultivable, sobre todo en China. Por consecuencia monitorearon y modelaron la expansión urbana mediante una combinación de teledetección, sistema de información geográfica y estadísticas espaciales, de esta manera concluyen que la integración de sensores remotos, un sistema de información geográfica y estadísticas espaciales ofrece una excelente oportunidad para explorar la variación espacio-temporal y las interacciones entre los distritos en las áreas metropolitanas en expansión.

A su vez, Deep y Saklani (2014) indican que los asentamientos de población en las ciudades de rápido crecimiento deben ser monitoreados para diseñar un hábitat urbano sostenible. Mediante un modelo que crearon con ayuda de teledetección y sistemas de información geográfica pudieron comprender la dinámica urbana en ciudades de rápido crecimiento. Y según ellos, al ser una herramienta efectiva para codificar estructuras espaciales, la información generada podría utilizarse para predecir escenarios urbanos para un crecimiento sostenible.

El análisis geográfico, la simulación espacial y la optimización suelen ser procesos separados que abordan problemas diferentes. Sin embargo, para Li *et al.* (2011) es cada vez más necesario integrarlos. Particularmente en un área en rápido

crecimiento, el desarrollo a simular es rara vez inercial (es decir, siguiendo estrictamente la tendencia histórica); en cambio, es probable que sea interferido por nuevas medidas de planificación.

En su opinión, Sun *et al.* (2013) afirman que se requieren métodos cuantitativos para ayudar a los planificadores del uso del suelo a nivel local, regional y estatal. Es por ello que realizaron un estudio en el que se utilizó un enfoque integrado de teledetección y sistemas de información geográfica para identificar tres tipos de crecimiento urbano: crecimiento saturado, crecimiento periférico y crecimiento de expansión de bordes urbanos.

Recientemente, modelos de expansión urbana han sido creados por medio de Autómata Celular con parámetros reales de las ciudades, como por ejemplo el crecimiento poblacional y la expansión de las vialidades (Wu *et al.*, 2016). Sin embargo, Gonzales *et al.* (2015) opinan que tradicionalmente estos modelos han empleado una representación regular del territorio a partir de una rejilla raster, unidad espacial que no se ajusta a la realidad de la práctica del desarrollo urbano, basada en una división del territorio en parcelas catastrales. En este contexto, se presentaron prototipos de modelos basados en Autómata Celular para la simulación del crecimiento urbano que emplea como unidad espacial básica la fracción catastral.

Ewing *et al.* (2016) probaron en un estudio la relación entre la expansión urbana y la alta movilidad en las zonas urbanas de Estados Unidos de América. Examinaron las vías potenciales a través de las cuales la expansión puede tener un efecto sobre la movilidad. Usaron modelos de ecuaciones estructurales para encontrar los efectos directos e indirectos de la expansión en la movilidad. De esta forma encontraron que la movilidad es significativamente mayor en áreas compactas que en áreas extensas.

Hoy en día la caracterización del desarrollo urbano y los patrones de expansión es esencial para la planificación urbana integradora y la sostenibilidad regional.

Es por ello que Tong *et al.* (2017) proporcionaron un modelo de desarrollo para la caracterización del desarrollo urbano junto con un marco para cuantificar las relaciones de ciertos indicadores del crecimiento de las ciudades y patrones de expansión. Por otro lado, Tian *et al.* (2017) deducen que la medición del grado de expansión urbana depende en gran medida del contexto local y de los datos disponibles. Para comprobarlo establecieron un índice multidimensional que combina la expansión de la ciudad, la compacidad y forma urbana para medir la expansión. Encontraron también que la planificación está fuertemente correlacionada con la expansión de una urbe.

Dentro del estado de arte existen diversos estudios que se han realizado bajo el enfoque de modelar el crecimiento urbano con el fin de predecir las condiciones futuras. En la Tabla 2.1 se muestra un concentrado de los principales estudios en orden cronológico y se resume su contenido abordando su objetivo, metodología y resultados. Al final se comentan las comparaciones entre ellos, encontrando así las similitudes principalmente en las variables con las que se alimentó cada modelo.

Tabla 2.1. Comparación de estudios de simulación de crecimiento urbano.

Autor(es)	Objetivo	Metodología	Resultados
Allen y Lu (2003)	Desarrollaron un enfoque integrado basado en sistemas de información geográfica para modelar y predecir el crecimiento urbano en términos de cambio en el uso del suelo.	El modelo se basó en un marco logístico binomial, está diseñado para simular el crecimiento urbano bajo diferentes escenarios. Este estudio utilizó un enfoque holístico de modelado, integrando ciertos componentes elegidos de tres esquemas de modelado diferentes.	Los resultados indican que el modelo logístico es estadísticamente confiable para la predicción a corto plazo, pero se vuelve menos confiable para períodos de tiempo amplios. Su poder predictivo varió espacial y temporalmente con diferentes tipos de uso de suelo.

Continuación

Autor(es)	Objetivo	Metodología	Resultados
Leao <i>et al.</i> (2004)	Investigaron hasta qué punto los modelos de crecimiento urbano basados en Automatas Celulares existentes probados en países desarrollados también pueden aplicarse a un área urbana de un país en desarrollo.	Establecieron el área de estudio, estudiaron y probaron diferentes modelos existentes, se seleccionó Clarke UGM para su aplicación en este estudio. Los datos utilizados son de crecimiento histórico, transporte histórico, un modelo de elevación digital y áreas de protección no urbanizables.	Encontraron patrones locales distintivos y efectos del crecimiento urbano, conformados por estructuras espaciales urbanas locales. Muestra la importancia de los estudios de políticas y el trabajo de campo en la interpretación de los resultados generados a partir de modelos estadísticos y SIG.
Luo y Wei (2009)	Emplearon regresiones logísticas globales y locales para modelar la probabilidad de expansión de la mancha urbana contra un conjunto de variables espaciales.	Alimentaron el modelo mediante datos de uso de suelo y crecimiento histórico, emplearon un modelo de regresión logística global y otro de regresión logística ponderada geográficamente encontrando así variaciones espaciales de los patrones de los patrones de crecimiento urbano.	Encontraron el significado de la proximidad, las condiciones del vecindario y la aglomeración urbana. El modelo presenta mayor ajuste y menor nivel de autocorrelación espacial de residuos.
Kim (2009)	Desarrolló el método de escenario ponderado utilizando el método de proceso jerárquico analítico para simular la expansión urbana utilizando modelos de autómatas celulares distribuidos y para generar planificación de uso de la tierra como datos básicos.	Formuló matemáticamente el método y lo aplicó a la región de prueba por medio de mapas de uso de suelo y así generar una matriz para calcular una ponderación con lo cual se generaron mapas de potencial de urbanización.	Los resultados de este estudio mostraron que el modelo puede usarse para generar los mapas de potenciales óptimos para la planificación del uso del suelo en el área urbana marginal.
Ying <i>et al.</i> (2009)	Este documento describe el modelo de desarrollo urbano de Beijing que adopta el enfoque de autómatas celulares para apoyar la planificación urbana y la evaluación de políticas.	Integra la regresión logística y MonoLoop para obtener las cantidades para la regla de transición con una configuración de evaluación multicriterio. El análisis de sensibilidad local para todos los parámetros se utiliza para evaluar el rendimiento del modelo.	Se demostró que el modelo es capaz de analizar los mecanismos históricos de crecimiento urbano y predecir el crecimiento urbano futuro de las áreas metropolitanas en China.

Continuación

Autor(es)	Objetivo	Metodología	Resultados
Ahmed y Bramley (2015)	Buscan ampliar el conocimiento sobre la comprensión de los patrones de crecimiento urbano espacial y los procesos implicados de un caso de estudio.	Utilizan los marcos de modelos espaciales híbridos, que incorporan modelos estadísticos junto con funciones de autómatas celulares.	El modelo se probó como un cuadro de simulación de un planificador para generar un escenario de futuro cercano. Parece tener suficiente potencial experimental para implementar un proceso de modelado espacio-temporal de uso de suelo más extenso.
Badwi <i>et al.</i> (2015)	Utilizaron la mezcla de autómatas celulares con sistemas de información geográfica para generar simulaciones y predicciones realistas de asentamientos informales en el contexto de áreas no planificadas.	Utilizaron plataforma SLEUTH (Slope, Land use, Exclusion, Urban, Transportation, and Hillshade) que es un modelo creado por US Geological Survey y el Departamento de Geografía de la Universidad de California. El modelo produjo imágenes multi-datos que se utilizaron para mejorar la visualización de la dinámica urbana.	El modelo proporcionó una oportunidad para desarrollar un medio de animación visual. Los resultados mostraron que la aplicación exitosa de un modelo en un área geográfica particular no implica su uso efectivo en otro entorno donde las características han seguido diferente desarrollo.
Liu <i>et al.</i> (2015)	Propusieron un modelo de expansión urbana llamado modelo de simulación de diferentes patrones de crecimiento urbano, que puede funcionar bien tanto en patrones de crecimiento adyacentes, como en patrones de crecimiento periféricos.	Dividieron la región no urbana en dos categorías. Diferentes métodos fueron utilizados para simular la expansión urbana. Se propuso un modelo de autómatas celulares basado en el potencial de crecimiento urbano para simularlo en regiones de expansión urbana seleccionadas aleatoriamente, basadas en el modelo de selección discreta y el método de Monte Carlo.	El modelo pudo simular eficazmente el crecimiento urbano periférico con una precisión de simulación mejorada en comparación con el modelo de autómatas celulares tradicional, además de explicar las causas y procesos de expansión de la mancha urbana.

Continuación

Autor(es)	Objetivo	Metodología	Resultados
Veerbeek <i>et al.</i> (2015)	Presentan un algoritmo automático adaptado para optimizar un conjunto de parámetros aplicado en un modelo de cambio de uso y superficie de suelo basado en Dinamica-EGO.	Se aplica un algoritmo memético secuencialmente para optimizar un conjunto de parámetros extendiendo un algoritmo genético con una función de búsqueda local. Se aplica un enfoque de dos etapas donde la expansión de la extensión urbana y la diversificación de las clases urbanas se calculan.	Los resultados muestran repetidamente una convergencia mucho más rápida hacia una alta bondad de ajuste; se pueden usar significativamente menos iteraciones y un tamaño de población más pequeño para lograr un nivel de rendimiento similar al que se usa con una calibración estándar.
Zheng (2015)	Propone el análisis dinámico de simulación basándose en las teorías y métodos relevantes al análisis espacial de aglomeraciones urbanas.	Sistema de cuadrícula por celdas para crear mapas con ayuda de software GIS. Elaboró curvas tridimensionales utilizando el modelo centrífugo, construyó mapas para simular dinámicamente la expansión de la mancha urbana.	Se resumieron la tendencia de desarrollo pasada y futura y las características de la aglomeración urbana.
Wu <i>et al.</i> (2016)	Propusieron un modelo de expansión urbana para captar la relación del proceso evolutivo entre la propagación de la población y el desarrollo de vialidades.	Se adopta el proceso de difusión física, que considera la influencia de la topología de la red vial y del factor de exploración aleatoria, para analizar la propagación de la población a partir del modelo de las autómatas celulares.	Mediante el análisis de sensibilidad de los coeficientes, se concluyó que el coeficiente de difusión influye considerablemente en la accesibilidad urbana y el factor aleatorio determinará la velocidad de crecimiento espacial de la ciudad.
Jafari <i>et al.</i> (2016)	Crearon un modelo para predecir la expansión futura de una zona urbana para los años objetivo de 2025 y 2037 a través de una simulación mediante sistemas de información geográfica, célula automática y cadena de Markov.	Integraron sistemas de información geográfica, teledetección y el modelo de Autómatas Celulares, analizaron la dinámica espacio-temporal y la evolución del cambio en el uso de suelo para predecir el estatus urbano.	Encontraron que el modelo es una herramienta eficiente para el apoyo de las decisiones de planificación urbana y facilita el proceso de desarrollo urbano sostenible. Predijo un aumento alarmante en el desarrollo urbano para los años objetivos de estudio.

Continuación

Autor(es)	Objetivo	Metodología	Resultados
El Garouani <i>et al.</i> (2017)	Analizan la relación entre la urbanización y los cambios en el uso de suelo y su impacto en el paisaje urbano de la zona de estudio, así como la importancia del aumento de las áreas protegidas.	Utilizaron imágenes satelitales y datos de censos para identificar diferentes patrones de cambio de suelo y crecimiento de la ciudad para el período 1984-2013. La clasificación y el análisis de las imágenes satelitales se realizaron utilizando Erdas imagine y ArcGIS Software. La expansión urbana se evaluó durante 29 años (1984 2013).	La precisión general de los mapas, generados a partir de los métodos de detección de cambios varió del 78% al 87%. Los mapas mostraron que entre 1984 y 2013 la cantidad de tierra urbana o desarrollada aumentó en aproximadamente 121%, mientras que la cobertura rural por agricultura y bosque disminuyó respectivamente en 11% y 3%.
Frankhauser <i>et al.</i> (2017)	Proponen un marco conceptual para el diseño de planes de desarrollo urbano multifractal o regional que se adhieran a cinco principios de planificación: urbano policéntrico; orientado al tránsito; desarrollo residencial denso local; introducción de áreas verdes en áreas; preservación de redes interconectadas de áreas naturales de varios tamaños.	Se basan en el modelado espacial multifractal, que es intrínsecamente multiescalar. La aplicación de software basada en GIS Fractalopolis (versión actual 1.0) se utilizó para aplicar este marco conceptual a estudios de casos del mundo real. Usaron Fractalopolis para crear un desarrollo multifractal	Crearon un plan de desarrollo multifractal para un área metropolitana francesa de tamaño medio (Besançon), para el año 2026. Este plan permite una transformación "suave" realista del área metropolitana de acuerdo con los cinco principios de planificación mencionados y hace que la región sea más multifractal.
Guan y Rowe (2017)	Implementaron un modelo de distribución espacial basado en la autómatas celular bajo el enfoque de la relación del desempeño económico y el crecimiento urbano previsto.	Desarrollaron un modelo por medio de una línea de base para el desempeño económico, la ubicación de este desarrollo perpendicular a los corredores frecuentemente transitados es su variable de alimentación.	Obtuvieron las ciudades más significativas del corredor de estudio, sus conexiones principales, encontrando por medio de la modelación las que próximamente serán limitadas.

Continuación

Autor(es)	Objetivo	Metodología	Resultados
Han y Jia (2017)	Utilizaron un enfoque de modelado integrado basado en la cadena de Markov, regresión logística y autómatas celulares para estudiar los cambios dinámicos en el uso del suelo.	Mediante una matriz de transferencia de vecindad determinaron la influencia de la célula central y los vecindarios, la regresión logística fue ajustada por factores. Construyeron tres escenarios mediante el establecimiento de políticas de uso de suelo, la demanda y el zonificación del futuro transporte público.	Los resultados indicaron que un patrón urbano extendido tenderá a la zona en el futuro, mientras que el desarrollo de la zonificación para la preservación de las características ecológicas en las zonas rurales y urbanas, aliviará el deterioro ambiental.
Jat <i>et al.</i> (2017)	Evalúan el rendimiento del sistema SLEUTH basado en un modelo de autómata celular para simular el crecimiento urbano de un área urbana compleja y heterogénea, una ciudad que es bastante diferente en comparación con las áreas donde SLEUTH se ha probado en países desarrollados.	Se procesaron y utilizaron siete imágenes satelitales multiespectrales que abarcan más de 21 años de información para la parametrización de SLEUTH. Los resultados del crecimiento urbano pronosticados por SLEUTH se compararon con otros métodos de uso de suelo / explotación de la superficie terrestre.	Se demostró que el estudio tiene éxito al proporcionar una visión significativa de los problemas que contribuyen a las incertidumbres en la predicción del crecimiento urbano de áreas urbanas heterogéneas.
Smith <i>et al.</i> (2017)	Cuantificar empíricamente cómo los propietarios de zonas de bosques en una región que se urbaniza rápidamente toman decisiones cuando enfrentan un desarrollo invasivo.	Utilizan un modelo de elección discreta para determinar factores que influyen en la venta de propiedades no desarrolladas a través de escenarios de crecimiento urbano. Analizan los datos utilizando un enfoque Bayesiano. Combinan teorías de economía con datos espacio-temporales.	El modelo reveló que el aumento en el valor de las propiedades influyó positivamente en la probabilidad de que un propietario vendería su propiedad. También entre más se acercaba el desarrollo a una propiedad no desarrollada y forestal, era más probable que los propietarios la vendieran.

Continuación

Autor(es)	Objetivo	Metodología	Resultados
Li <i>et al.</i> (2017)	Proponen un modelo de crecimiento urbano basado en parches con reglas heurísticas que emplean el modelo logístico de Autómata celular con un algoritmo de segmentación de líneas divisoras (Segmentación-parche-autómata celular).	Los objetos de segmento derivados del modelo de autómata celular urbano se consideraron como parches. Se identificaron y simularon por separado dos tipos de crecimiento urbano, es decir, crecimiento orgánico y crecimiento espontáneo, mediante la introducción de un índice de expansión del paisaje que se basó en el análisis de densidad de urbanización.	El modelo propuesto produjo un paisaje urbano realista (96.00% y 97.38%) y mostró un buen rendimiento cuando se compara con otros modelos de autómatas celulares basados en parches, pero con menos incertidumbre. El modelo proporcionó un marco muy flexible para incorporar parches usando segmentos basados en píxeles..
Ma <i>et al.</i> (2017)	Desarrollar un marco basado en la optimización para delimitar los límites de crecimiento urbano óptimos mediante la incorporación de procesos dinámicos y la planificación de intervenciones en un algoritmo de optimización.	La conectividad local, los valores de utilidad total y la asignación de cantidad se integraron en el mecanismo de intercambio para hacer el algoritmo adaptable para la delimitación del límite de crecimiento urbano.	En comparación con escenarios de planificación de expertos, los límites de crecimiento urbano óptimos delimitados por el modelo son prácticos. Los resultados indican que los métodos de optimización espacial son eficaces para delimitar áreas urbanas.
Pérez-Molina <i>et al.</i> (2017)	Acoplar un modelo de autómata celular con la herramienta de modelado de inundación integrada openLISEM para simular escenarios de crecimiento urbano y su consecuente nivel de inundación.	El modelo de crecimiento urbano hace uso de una variable de respuesta continua (el porcentaje de área urbanizada) y una simulación de suministro espacialmente explícita para el desarrollo urbano.	La herramienta resultó útil para generar escenarios significativos de cambio en la cobertura del suelo y comparar sus impulsores de políticas como medidas de mitigación de inundaciones en un entorno de escasez de datos.

3. HIPÓTESIS

El modelo de simulación dinámica del crecimiento urbano que considere el crecimiento histórico de la ciudad, los desplazamientos de los individuos, el uso de suelo, entre otros factores, permite explicar el crecimiento urbano de una ciudad media mexicana en un 90%.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Reforzar un modelo que exprese el patrón de crecimiento de una zona metropolitana mediante variables que estén íntimamente ligadas con la expansión urbana para simular el crecimiento y posibilitar con dicho modelo planes de desarrollo ordenado para la ciudad.

4.2 Objetivos particulares

- Identificar los parámetros adicionales que originarían mejoras en el modelo y que muestran relación con el fenómeno del caso de estudio.
- Evaluar la significancia de las variables que se utilizarán para alimentar el modelo.
- Modelar el crecimiento urbano de la zona de estudio mediante un Sistema de Información Geográfica.
- Analizar la precisión del modelo para la predicción de la expansión urbana tomando en cuenta los parámetros determinados en esta investigación.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 El fenómeno urbano y metropolización

La urbanización es definida por Azócar *et al.* (2003) como un proceso de difusión causado por la interacción de diferentes factores, cuyo resultado más concreto son los cambios en la estructura socio-espacial de las ciudades y de su entorno inmediato. Este fenómeno ha provocado que el 54% de la población mundial actual resida en áreas urbanas y se prevé que para 2050 llegará al 66%, según datos de un informe de la ONU (2014). Señala, además, que se ha pasado de 10 megaciudades (ciudades con más de 10 millones de habitantes) en 1990 a 28 en 2014.

Para Roca (2010), el crecimiento extensivo de las grandes ciudades no ha sido el único fenómeno del cambio urbano a lo largo del siglo. La transformación más relevante ha consistido en el cambio de escala experimentado en el sistema urbano, produciéndose un proceso de expansión que no sólo ha desbordado los límites administrativos tradicionales (municipios, comunas, counties, ...), sino que también ha llegado a invadir regiones enteras. La metropolización del crecimiento urbano ha sido, por tanto, el rasgo principal de ese proceso. En la Figura 5.1 se esquematiza el proceso de urbanización descrito anteriormente.

5.1.1 Metropolización

La continuidad es uno de los rasgos de lo metropolitano, aunque también conlleva la integración económica y funcional, además del carácter urbano; en este caso la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (2016), define a las zonas metropolitanas como: centros de población o conurbaciones que, por su complejidad, interacciones, relevancia social y económica, conforman una unidad territorial de influencia dominante y revisten importancia estratégica para el desarrollo nacional.

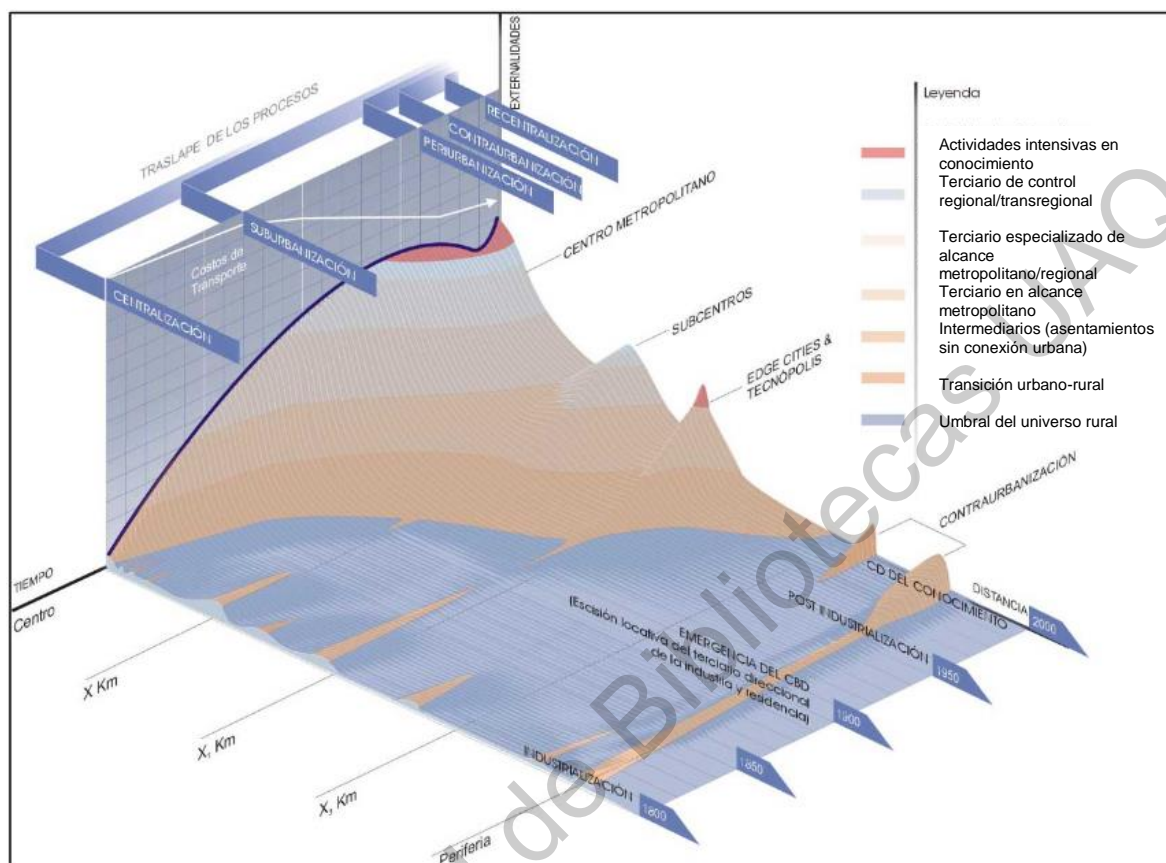


Figura 5.1. Esquema básico de los procesos de urbanización.

Fuente: Roca (2010).

Las zonas metropolitanas son los elementos del sistema urbano con mayor jerarquía dentro de una región o país, pues en ellas se presenta la mayor concentración de población, dinámica y economía, y su conformación se ha venido generando en ciudades medias (poblaciones de cien mil a un millón de habitantes) que sufren un proceso de expansión territorial y de asentamientos irregulares en zonas periurbanas en las que, de acuerdo con Bazant (2010), se aprecian actividades comerciales y de servicios, y donde dicha expansión se presenta normalmente en dirección radial alrededor del centro de la ciudad o en dirección lineal a lo largo de la infraestructura vial. Otra característica de una zona metropolitana es que en ellas pueden coexistir localidades de carácter urbano y rural.

5.1.1.1 Criterios para delimitación de zonas metropolitanas

A continuación, se comparan y discuten los diferentes criterios utilizados en México (INEGI *et al.*, 2015), Estados Unidos de América (OMB,2010), Canadá (Puderer, 2008) y Japón (Kanemoto y Kurima, 2005), estos últimos elegidos por su amplia experiencia en fenómenos metropolitanos y por presentar criterios similares en su metodología de delimitación. El propósito es identificar cuáles son los parámetros que se han manejado en la actualidad y las similitudes con los adoptados en México.

En la Tabla 5.1 se resumen los criterios establecidos para cada uno de los países comentados con anterioridad.

Tabla 5.1 Criterios para delimitar zonas metropolitanas.

Parámetro	País	Criterio
Requisito de población	Estados Unidos	Área metropolitana: Área urbanizada con población mínima de 50,000.
		Área Micropolitana: Grupo urbano con una población de al menos 10,000 personas pero con menos de 50,000.
	Canadá	Censo de área metropolitana: un área urbana con población de al menos 50,000 pero con una población total de al menos 100,000.
		Censo de aglomeración: Un área urbana con una población al menos de 10,000 pero menor que el rango de un censo de área metropolitana.

Continuación

Parámetro	País	Criterio
	Japón	Área micropolitana de empleo: La población en el distrito densamente poblado debe de ser al menos de 10,000 pero menor a 50,000.
	México	Dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50,000 o más habitantes.
		Municipios que contienen una ciudad de un millón o más habitantes.
		Ciudades de 250,000 o más habitantes que comparten procesos de conurbación con ciudades de Estados Unidos.
Elección del núcleo	Estados Unidos	El condado o condados centrales de un núcleo de áreas estadísticas son aquellos con al menos 50% de su población en áreas urbanas o que dentro de sus límites tenga una población al menos de 10,000 habitantes.
	Canadá	El núcleo urbano debe tener una población igual al censo de área metropolitana o censo de aglomeración.
		Cualquier municipio de censo de subdivisión, con una parte en el núcleo urbano está incluido en el censo de área metropolitana. Solamente municipios de censo de subdivisión con 75% o más de su población residente en el núcleo urbano son incluidos.
	Japón	El distrito densamente poblado poblacional es de al menos 10,000 y el municipio no es área periférica para otro núcleo.

Continuación

Parámetro	País	Criterio
Elección del núcleo	Japón	Los requisitos para un área periférica están satisfechos y los siguientes dos requisitos se encuentran también satisfechos: 1) La relación empleados-residentes es al menos la unidad. 2) El distrito densamente poblado es al menos de 100,000 o un tercio del núcleo.
	México	Municipios que comparten una conurbación intermunicipal y cuya población en conjunto asciende a 50,000 o más habitantes.
		Municipios con localidades de 50,000 o más habitantes que muestran un alto grado de integración física y funcional con municipios vecinos predominantemente urbanos.
Municipios, condados, distritos periféricos	Estados Unidos	Desplazamiento de avance: al menos 25% de los empleados del condado trabajan en el condado o condados centrales de un núcleo basado en área estadística.
		Desplazamiento invertido: Al menos 25% de los empleados en el condado es representado por los trabajadores residentes en el condado o condados centrales de un núcleo basado en área estadística .
	Canadá	Desplazamiento de avance: al menos el 50%
		Desplazamiento invertido: al menos 25%
	Japón	Desplazamiento de avance: al menos 10%
México	La localidad principal está ubicada a no más de 10 kilómetros por carretera pavimentada y de doble carril.	

Continuación

Parámetro	País	Criterio
	México	Desplazamiento de avance. Al menos 15% de su población ocupada trabaja en los municipios centrales.
		Desplazamiento invertido. 10% o más de la población que trabaja en el municipio reside en los municipios centrales.
		Tiene un porcentaje de población económicamente activa ocupada en actividades industriales, comerciales y de servicio mayor o igual a 75%.
		Tiene una densidad media urbana de por lo menos 20 habitantes por hectárea.

Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Patrones de desarrollo de las ciudades

En términos de números absolutos, el crecimiento de las ciudades en el mundo en desarrollo es diez veces mayor que en las ciudades de países desarrollados. Anualmente, las ciudades en el mundo en desarrollo crecieron a una tasa de 2.5% en la década de 1990, en comparación con una tasa de crecimiento anual de 0.3% en países desarrollados. Mientras que las tasas de crecimiento urbano muy altas caracterizan el cambio en las ciudades en países en desarrollo, el crecimiento y el declive moderados son la norma en las naciones desarrolladas (United Nations Human Settlements Programme, 2008).

5.1.2.1 Características de ciudades en países desarrollados

Las ciudades europeas, en general, ya no crecen, incluidas las ciudades de las naciones de la Comunidad de Estados Independientes.

Las ciudades de América del Norte crecieron más rápido entre 1990 y 2000, particularmente las ciudades de los Estados Unidos, que crecieron en promedio un 1% anual.

En Australia y Nueva Zelanda, el patrón subyacente al crecimiento o declive urbano no es tan evidente como en otras partes del mundo desarrollado. La tendencia general en los dos países es el crecimiento urbano lento, con casi la mitad de las ciudades creciendo a menos de 1% anual.

5.1.2.2 *Características de ciudades en países en desarrollo*

En las últimas dos décadas, la población urbana del mundo en desarrollo ha crecido en un promedio de 3 millones de personas por semana. A mediados del siglo XXI, la población urbana total del mundo en desarrollo se duplicará con creces (United Nations Human Settlements Programme, 2008).

Desde 1950, 30 ciudades crecieron más de veinte veces y docenas de ciudades importantes, incluyendo la ciudad de Kuwait en Kuwait y Tuxtla Gutiérrez en México se han multiplicado por diez; algunos, incluido Abidjan en Côte d'Ivoire, han ampliado su población más de 20 veces en los últimos 50 años. Estos sucesos reflejan cambios importantes en las actividades económicas y las estructuras de empleo desde la agricultura hasta la industria y los servicios, y una diversificación de la economía de los países en desarrollo (Satterthwaite, 2007).

El aspecto más interesante del crecimiento urbano en el mundo en desarrollo no tiene mucho que ver con el tamaño de la ciudad o las tasas de crecimiento, como comúnmente se cree, aunque ambos suceden en un orden de magnitud mayor en el mundo en desarrollo que en el mundo desarrollado. La verdadera historia es el tamaño absoluto de los incrementos de crecimiento, especialmente en Asia y África, y el papel que las diferentes ciudades juegan en este crecimiento (UNFPA, 2007).

África y Asia se están urbanizando rápidamente, con aproximadamente el 40% de sus habitantes viviendo en ciudades. Se espera que la región experimente tasas significativamente altas de urbanización en los próximos 20 años; las proyecciones indican que uno de cada dos asiáticos vivirá en ciudades en algún momento antes del año 2025 (Cohen, 2004).

En su estudio, Rodríguez (2007) expone que América Latina y el Caribe es la región más urbanizada del mundo en desarrollo, con el 77% de su población viviendo en ciudades. La región continuará urbanizándose en las próximas dos décadas, y la proporción de la población urbana alcanzará el 85%.

5.1.3 Ciudades medias

Ciudades medias es un concepto nuevo y está conectado a las políticas de desarrollo territorial. A nivel mundial, los centros urbanos que tienen entre 20,000 y 2,000,000 habitantes se consideran ciudades intermedias; este rango varía según el contexto cultural, territorial, demográfico y económico. Independientemente del rango de población considerado, estas ciudades juegan un papel enorme a nivel mundial (Aguayo *et al.*, 2007).

En el ámbito de ciudades medias, Bellet Sanfeliu y Llop Torné (2004) indican que aproximadamente el 62% de la población urbana del mundo reside en ciudades con menos de un millón de habitantes.

Aunque los criterios de población proporcionan cierta claridad con respecto a estas ciudades, están incompletos sin el concepto de intermediación, que da sentido a la definición de ciudades intermedias. La intermediación urbana se refiere al papel de la ciudad en la estructuración topológica, es decir, su integración y funciones de articulación en vastos territorios. Además, con respecto a la escala, las ciudades medianas se caracterizan por una administración fácil y menos conflictos sociales y problemas ambientales (Bellet Sanfeliu y Llop Torné 2004).

5.1.4 Planeación urbana

La planificación urbana es un proceso técnico y político relacionado con el desarrollo y diseño del uso del suelo y el entorno construido, que incluye aire, agua y la infraestructura que entra y sale de las áreas urbanas, como transporte, comunicaciones y redes de distribución y la provisión de servicios municipales a residentes y visitantes. En este contexto, Taylor (1998) aclara que la planificación urbana se ocupa de la disposición física de los asentamientos humanos. Por otro lado, Midgley (1999) sugiere que la preocupación principal es el bienestar público, que incluye consideraciones de eficiencia, saneamiento, protección y uso del medio ambiente, así como los efectos en las actividades sociales y económicas.

Recientemente, en palabras de Simandan (2018), la planificación urbana se considera un campo interdisciplinario que incluye ciencias sociales, de ingeniería y de diseño. Está estrechamente relacionado con el campo del diseño urbano y algunos planificadores ofrecen diseños para calles, parques, edificios y otras áreas.

5.1.5 Zona Metropolitana de Querétaro

La Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ), es un conjunto de poblaciones conurbanas y relacionadas por su cercanía y funcionalidad con la población de Santiago de Querétaro, en el estado de Querétaro. Está integrada por los municipios de Querétaro, Corregidora, El marqués, Huimilpan y Apaseo el alto. Cuenta con una población de 1,323,640 habitantes, una superficie de 2,427 km² y una densidad media urbana de 96 habitantes/hectárea (INEGI *et al.*, 2015).

Hoy en día la Zona Metropolitana de Querétaro, según Göbel (2015), por su ubicación geográfica, posee una función de vínculo, ya que presenta conexiones tanto hacia la Ciudad de México como hacia el Bajío.

Mientras que el comercio y los servicios se orientan hacia el sector agrario característico del Bajío, Querétaro está relacionado industrialmente de manera

directa con la Ciudad de México, de modo que la ciudad representa un importante nodo de comunicaciones.

Göbel (2015), continúa en su análisis comentando que el fulminante crecimiento poblacional se basó ante todo en la constante inmigración, así como en el atractivo de la aglomeración urbana, mientras que el crecimiento natural de la población decreció con la progresiva abundancia económica.

5.2 Sistemas de Información Geográfica (SIG) en estudios urbanos

En general, se pronostica que el siglo XXI verá proporciones crecientes de la población mundial residente en zonas urbanas, es por ello que Longley *et al.* (2010) indican que la comprensión a los impactos de los asentamientos urbanos requiere que se le preste más atención. Debido a ello, los investigadores han utilizado Sistemas de Información Geográfica para investigar y comprender cómo se produce la expansión urbana, a fin de entender su desarrollo. Sus estudios se basan en patrones históricos de crecimiento, en conjunto con información sobre la ubicación de vialidades, pendientes muy pronunciadas, zonas protegidas del uso urbano y otros factores que fomentan o restringen el desarrollo urbano. Cada uno de estos factores puede representarse en forma de mapa, como una capa en los Sistemas de Información Geográfica, utilizándose para representar y simular los procesos que impulsan el crecimiento urbano.

Según López (2015), un Sistema de Información Geográfica es un conjunto de herramientas compuestas por hardware, software, datos y usuarios, que permite capturar, almacenar, administrar y analizar información digital, así como realizar gráficos y mapas, y representar datos alfanuméricos. De acuerdo a Burrough (1994) un SIG también puede entenderse como un modelo informatizado de la realidad geográfica para satisfacer unas necesidades de información concretas, esto es, crear, compartir y aplicar información útil basada en datos y en mapas.

5.2.1 Funcionamiento

Los SIG tienen una serie de funciones diseñadas para la gestión de información geográfica, Rodríguez y Olivella (2010) indican los siguientes: entrada de datos (la creación de nuevos datos o el paso de información analógica a información digital), el almacenamiento, la recuperación, el análisis y la consulta de datos (para la creación de bases de datos, topología, consultas gráficas, alfanuméricas, combinadas, superposición de planos e información) y, finalmente, las salidas de datos (impresión de informes, impresión de planos y publicación en varios formatos electrónicos).

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de los mapas digitales. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía. Proporciona también, para cada tipo de organización basada en ubicación, una plataforma para actualizar datos geográficos sin perder tiempo visitando el sitio y actualizar la base de datos manualmente.

Según el Laboratorio Unidad Pacífico Sur del Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (2010), la razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología geoespacial de los objetos, con el fin de generar una nueva que no podríamos obtener de otra forma.

Por ser tan versátiles, el campo de aplicación de los sistemas de información geográfica es muy amplio, pudiendo utilizarse en la mayoría de las actividades con

un componente espacial. La profunda revolución que han provocado las nuevas tecnologías ha incidido de manera decisiva en su evolución.

5.2.2 Representación de datos

Los datos SIG representan los objetos del mundo real (carreteras, uso del suelo, altitudes, entre otros aspectos). Los objetos del mundo real se pueden dividir en dos abstracciones: objetos discretos (una casa) y continuos (cantidad de lluvia caída, una elevación).

Casi todos los elementos que se encuentran sobre la superficie terrestre pueden ser codificados para que una computadora los pueda comprender, y en función del tipo de información se puede usar un modelo de datos u otro. Lo que no es tan evidente, es la forma de representar el mundo real a un medio digital (ESRI, 2010).

A pesar de la heterogeneidad de la información geográfica, existen dos aproximaciones básicas para simplificar y modelizar el espacio, de modo que éste pueda ser almacenado y manipulado en un sistema informático, dando lugar, por tanto, a dos modelos de datos: el modelo vectorial, habitualmente utilizado para tratar fenómenos geográficos discretos (vías de comunicación, tejidos urbanos, coberturas vegetales, etc.), y el modelo ráster usado generalmente para representar fenómenos continuos. Para Del Bosque *et al.* (2012), ambos sistemas son complementarios y conviven dentro de los SIG, aunque cada uno de ellos resulte más o menos apropiado para el estudio de un tipo de información específica.

5.2.2.1 Raster

Un tipo de datos raster es, en esencia, cualquier tipo de imagen digital representada en una cuadrícula.

La estructura de un raster se basa en una matriz de celdas representadas en filas y columnas, cada celda puede almacenar información de una variable (precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar, longitudes de onda del espectro electromagnético, etc.).

El modelo raster no recoge de forma explícita las coordenadas de cada una de las celdas, sino los valores de éstas. No resulta necesario acompañar a dichos valores de un emplazamiento espacial concreto, pues hacen referencia a un elemento particular de la malla, la cual representa una estructura fija y regular. Pero es necesario ubicar dicha malla en el espacio para después poder calcular las coordenadas de cada celda (Olaya, 2014).

5.2.2.2 *Vectorial*

En un SIG, los elementos geográficos se expresan con frecuencia como vectores, manteniendo las características geométricas de las figuras.

El modelo de datos vectorial se basa en el supuesto de que la superficie de la Tierra se compone de objetos discretos tales como árboles, ríos, lagunas, etc. (ESRI, 2010). En este modelo, no existen unidades fundamentales que dividen la zona, sino que se une la variabilidad y características de esta mediante entidades geométricas. Para cada entidad geométrica las características son constantes. La forma de estas entidades se codifica de modo explícito, porque modeliza el espacio geográfico a través de una serie geométrica que contiene los elementos más destacados de dicho espacio. Estas series son de tres tipos: puntos, líneas y polígonos (Olaya, 2014).

- Puntos. Se utilizan para las entidades geográficas que mejor pueden ser expresadas por un único punto de referencia. En otras palabras: la simple ubicación. También se pueden utilizar para representar zonas a una escala pequeña.

- Líneas o polilíneas. Son utilizadas para rasgos lineales como ríos, caminos, ferrocarriles, rastros, líneas topográficas o curvas de nivel. De igual forma que en las entidades puntuales, en pequeñas escalas pueden ser utilizados para representar polígonos. En los elementos lineales puede medirse la distancia.
- Polígonos. Representan elementos geográficos que cubren un área particular de la superficie de la tierra. Estas entidades pueden representar lagos, límites de parques naturales, edificios, provincias, o los usos del suelo, por ejemplo. Los polígonos transmiten la mayor cantidad de información en archivos con datos vectoriales y en ellos se pueden medir el perímetro y el área.

5.2.3 Sistemas de coordenadas y proyecciones cartográficas

Tal como un mapa tiene escala, también contiene su respectiva ubicación. Los sistemas de coordenadas son marcos que se usan para definir posiciones únicas. Por ejemplo, en geometría se utilizan coordenadas x (horizontal) e y (vertical) para definir puntos en un plano de dos dimensiones. El sistema de coordenadas que se emplea más comúnmente para definir ubicaciones en el planeta de forma tridimensional se llama sistema de coordenadas geográficas (GCS), y se basa en una esfera o esferoide. Un esferoide es simplemente una esfera que es un poco más ancha que alta y se aproxima más a la verdadera forma de la tierra. Las esferas se usan comúnmente como modelos de la tierra por simplicidad (Campbell y Shin, 2012).

La unidad de medida en el GCS es grados, y las ubicaciones se definen por su latitud y longitud respectivas dentro del GCS. La latitud se mide en relación con el ecuador a cero grados, con máximos de noventa grados al Norte en el Polo Norte o noventa grados al Sur en el Polo Sur. La longitud se mide relativa al meridiano principal a cero grados, con máximos de 180 grados al Oeste o 180 grados al Este.

Es necesario transformar la forma tridimensional de la tierra en una superficie bidimensional, como una hoja de papel plana, una pantalla de computadora o una pantalla de dispositivo móvil para obtener formas de mapas y escalas de mapas más útiles. (Campbell y Shin, 2012).

Las proyecciones de mapas se refieren a los métodos y procedimientos que se utilizan para transformar el planeta esférico tridimensional en superficies planas bidimensionales. Específicamente, las proyecciones de mapas son fórmulas matemáticas que se utilizan para traducir la latitud y la longitud en la superficie de la tierra a las coordenadas x e y en un plano. Dado que hay un número infinito de formas en que se puede realizar esta traducción, hay un número infinito de proyecciones de mapas.

Las convenciones de nombres para muchas proyecciones de mapas incluyen la superficie y su orientación. Por ejemplo, como su nombre indica, las proyecciones planas usan el plano, las proyecciones cilíndricas utilizan cilindros y las proyecciones cónicas usan el cono. Para las proyecciones cilíndricas, el aspecto normal o estándar se refiere a cuando el cilindro es tangencial al ecuador (es decir, el eje del cilindro está orientado de Norte a Sur). Cuando el eje del cilindro está perfectamente orientado de Este a Oeste, el aspecto se denomina transversal, y todas las demás orientaciones se denominan oblicuas (Campbell y Shin, 2012).

5.2.4 Análisis espacial

El análisis espacial es el término genérico para todas las manipulaciones de datos espaciales llevadas a cabo para mejorar la comprensión de los fenómenos geográficos que representan los datos. Implica preguntas sobre cómo los datos en varias capas pueden relacionarse entre sí, y cómo varían en el espacio.

El objetivo del análisis espacial es, según Huisman y de By (2009), por lo general, obtener una mejor comprensión de los fenómenos geográficos mediante el

descubrimiento de patrones que antes no conocíamos, o el desarrollo de argumentos sobre los cuales basar decisiones importantes. Cabe señalar que algunas funciones de SIG para el análisis espacial son simples y fáciles de emplear, otras son mucho más sofisticadas y requieren altos niveles de habilidades analíticas y operativas.

5.2.5 Software SIG

La información geográfica puede ser consultada, transferida, transformada, superpuesta, procesada y mostrada utilizando numerosas aplicaciones de software.

Dentro de la industria, empresas comerciales como ESRI, Intergraph, MapInfo, Bentley Systems, Autodesk o Smallworld son algunas de las compañías más importantes, con mucha experiencia en el ámbito de geoprocésamiento y que ofrecen aplicaciones en este campo.

Por otro lado, el software libre ha entrado con fuerza en la última década en el sector, captando una importante masa de usuarios y desarrolladores y siendo una opción cada vez más elegida por empresas y administraciones públicas. Bajo el paraguas de la fundación OSGeo se agrupan muchos de los mejores y más relevantes proyectos de software libre de este tipo existentes hoy en día (Worboys y Duckham, 2004).

El manejo de este tipo de sistemas es llevado a cabo generalmente por profesionales de diversos campos del conocimiento (cartografía, geografía, topografía, entre otros), con experiencia en SIG, ya que el uso de estas herramientas requiere un aprendizaje previo que necesita conocer las bases metodológicas sobre las que se fundamentan. Aunque existen herramientas gratuitas para visualizar información geográfica, el acceso del público en general a los geodatos está dominado por los recursos en línea, como Google Earth y otros basados en tecnología web mapping.

5.2.6 Plataforma QGIS

QGIS (anteriormente llamado también Quantum GIS) es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre para plataformas *GNU/Linux*, *Unix*, *Mac OS* y *Microsoft Windows*. Era uno de los primeros ocho proyectos de la Fundación OSGeo y en 2008 oficialmente se graduó de la fase de incubación (Jürgen, 2014).

Permite manejar formatos raster y vectoriales a través de las bibliotecas *GDAL* y *OGR*, así como bases de datos. Algunas de sus características son:

- Soporte para extensiones espaciales.
- Manejo de archivos vectoriales *Shapefile*, *ArctInfo*, *coverages*, *Mapinfo*, *GRASS*, *GIS*, *DXF*, *DWG*, entre otros.
- Soporte para un importante número de tipos de archivos raster (*GRASS*, *GIS*, *GeoTIFF*, *TIFF*, *JPG*, entre otros).

Una de sus mayores ventajas es la posibilidad de usar Quantum GIS como *GUI* del *SIG GRASS*, utilizando toda la potencia de análisis de este último en un entorno de trabajo más amigable. QGIS está desarrollado en C++, usando la biblioteca Qt para su Interfaz gráfica de usuario (Jürgen, 2014).

5.2.6.1 Plugin MOLUSCE

MOLUSCE ofrece un complemento intuitivo y fácil de utilizar, que favorece a los usuarios con la realización de modelos y simulaciones. La interfaz gráfica de usuario consta de seis componentes principales (Al-Rubkhi, 2017):

- Entradas. Los mapas de uso / cobertura del suelo inicial (período 1) y final (período 2), así como las variables espaciales. La información sobre el uso del suelo/cambio de cobertura y la variable espacial se pueden utilizar para modelar y simular los cambios en el uso del suelo. En este paso, se comprobará la

geometría si todas las entradas coinciden y luego se movieron al siguiente paso.

- Correlación de evaluación. Esta pestaña comprende tres métodos, a saber, la correlación de Pearson, la incertidumbre conjunta de la información y el Coeficiente de Crammer, que se utilizan para verificar la correlación entre las variables espaciales.
- Cambio de área. En esta pestaña, se calculan las probabilidades de cambio de uso del suelo y de transición. También uso del suelo/mapa de cambio de cubierta producido. Las unidades de uso/cobertura del suelo se pueden expresar en metros cuadrados, kilómetros cuadrados y hectáreas.
- Modelización del potencial de transición. Si bien hay muchos métodos disponibles para calcular el mapa de potencial de transición, la Red Neural Artificial (ANN), la Evaluación de Criterios Múltiples (MCE), los Pesos de Evidencia (WOE) y la Regresión Logística (LR) están disponibles en este complemento. Cada método utiliza la información de uso del suelo y la variable espacial como entradas para calibrar y modelar el cambio de uso del suelo.
- Simulación. El mapa de potencial de transición, la función de certificación y los mapas simulados de uso del suelo se generan bajo este proceso. El enfoque de Autómata Celular se basa en el algoritmo de Monte Carlo.
- Validación. La validación calcula las estadísticas Kappa (Kappa estándar, Histograma Kappa y Ubicación Kappa).

5.3 Modelación del crecimiento urbano

Diversos modelos han sido adaptados al proceso de modelación de crecimiento urbano con la finalidad de entender y predecir éste fenómeno.

Según Berling-Wolff y Wu (2004), los primeros estudios de los procesos urbanos utilizados y los modelos de planificación del uso del suelo, basados en la teoría de la gravedad u optimización de las matemáticas, evolucionaron pronto a modelos espaciales dinámicos.

5.3.1 El modelado del crecimiento urbano y las vías terrestres

Las vialidades han desempeñado un papel importante en el desarrollo urbano a través de la accesibilidad que proporcionan y por el intercambio de bienes y servicios (Saunders *et al.*, 2002; Aljoufie *et al.*, 2013). En un contexto similar, Angel *et al.* (2011) y Zhang (2002) aseguran que la red vial, es el "esqueleto" del desarrollo urbano y la base de un importante factor de impulso para la expansión del uso de suelo de tipo urbano, adicionalmente, se ha observado que ésta se encuentra estrechamente vinculada con la expansión de las ciudades.

Los cambios en el interior de las ciudades, ocurren siguiendo un patrón de ejes y nodos en forma de red o telaraña, y, como lo explica Terrazas (2005), la expansión ocurre a lo largo de las vías de entrada y salida más importantes de la ciudad; es decir, siguiendo un esquema territorial de ejes.

Cualquier elemento de la infraestructura urbana es importante para el correcto funcionamiento del núcleo poblacional, sin embargo, Durán *et al.*, (2007) resaltan que, en el proceso de cambio de uso de suelo para su incorporación a la mancha urbana, el primer requisito para incluir un espacio a ésta es la existencia de una vialidad que los interconecte.

La literatura reciente ha confirmado el vínculo entre las redes de transporte y los patrones de desarrollo socioeconómico (Ji *et al.*, 2014; Aljoufie *et al.*, 2013), razón por la cual las vialidades se han convertido en un factor clave que permite pronosticar el crecimiento urbano a partir de modelos de previsión de expansión (Amato *et al.*, 2016).

De acuerdo con Achibet *et al.*, (2014), las áreas urbanas y la red vial están ligadas unas con otras, es decir, cada una de ellas es forzada por la otra. Wu *et al.*, (2016) concuerdan con Achibet *et al.*, (2014) al indicar que el crecimiento de la población y la red vial es un proceso de interacción en la evolución de una ciudad.

Durante las últimas dos décadas, la construcción de vialidades y el desarrollo urbano sin precedentes, adicionado a una poco funcional planeación urbana ha permitido la fragmentación directamente en el paisaje regional y lo ha alterado indirectamente al convertir las tierras de cultivo y áreas naturales en zonas urbanizadas (Song *et al.*, 2016).

De este modo, con ayuda de un modelo de simulación del crecimiento urbano, tal como el propuesto por Aljoufie *et al.* (2013), se evalúa el impacto a la infraestructura de transporte por medio de los resultados de su pronóstico de crecimiento urbano, de igual manera que en su modelo se incluye la variable de red vial. Similarmente, Maparu y Mazumder (2017) indican pronosticar la relación a largo plazo entre la infraestructura de transporte, el desarrollo económico y urbano mediante un modelo de simulación de crecimiento urbano.

Lyu *et al.* (2017) proponen desarrollar diseños urbanos mediante el análisis de escenarios que simulen el crecimiento de las ciudades. Sin embargo, la gestión de ciudades en crecimiento es crítica y compleja. El desarrollo de la urbanización aumenta en gran medida la comodidad de los residentes, pero al mismo tiempo conlleva riesgos de escasez de tierra cultivable, sobrepoblación, congestión de las vías de comunicación, problemas de seguridad alimentaria, contaminación ambiental, amenazas a la salud pública, entre otros problemas (Deng *et al.*, 2009). Por esta razón, Lämer *et al.* (2006) prioriza que la investigación sobre la regulación de la expansión urbana se ha vuelto aún más importante para mantener las ciudades de manera sostenible; ya que, la red vial, el “esqueleto” de la estructura espacial urbana, es una fuerza impulsora importante para la expansión espacial y uno de los indicadores clave del desarrollo urbano. Es por ello que, según Amekudzi *et al.* (2007), las redes de transporte cada vez mejor desarrolladas se han vuelto comunes en las ciudades modernas.

Para explorar los mecanismos de expansión urbana y enfrentar el desarrollo sostenible, Shi *et al.* (2019) sugieren que estudiar los patrones de expansión de la red vial mediante un modelo de crecimiento urbano es un punto de partida.

5.3.2 Simulación dinámica

Un modelo de simulación es aquel en el cual el modelo se inicia y continúa ejecutándose mediante un lapso de tiempo, obedeciendo las reglas lógicas que se han establecido, y es válido si es similar al problema para el que fue diseñado para simular, es decir, si los datos que produce se asemejan al comportamiento de la estructura del mundo real que simula (Snow, 2003).

Las simulaciones de cambio de uso del suelo y crecimiento urbano basadas en uno de los modelos empleados para predecir el crecimiento urbano, Autómata Celular, ha arrojado resultados aceptables en estos estudios, lo que demuestra, según Liang *et al.* (2018), que estos enfoques son aplicables a la simulación de sistemas urbanos.

La simulación del crecimiento urbano por periodos de tiempo, hace referencia a imitar lo que sucede en la realidad de la ciudad, y se comprueba su semejanza mediante la validación del modelo. Ejemplos de ello son los estudios realizados por Zheng (2014), Badwi *et al.* (2015), Jafari *et al.* (2016) y Ying *et al.* (2019).

Los primeros esfuerzos para modelar la dinámica espacial de las ciudades trataron el tiempo como un elemento continuo. Sin embargo, hoy en día la forma más común de representación temporal en los modelos urbanos dinámicos es a través de modelos recursivos o dinámicos en los que el estado final de un período de tiempo, generalmente en periodos de un año, sirve como el estado inicial del siguiente (Simmonds *et al.*, 2011). Para ellos, los modelos dinámicos hacen explícita la representación del cambio a través del tiempo, es decir, simulación dinámica, a diferencia de los modelos de equilibrio estático que abstraen el tiempo y se centran en una comparación de equilibrios hipotéticos.

El análisis estructural del sistema, la discusión de la interacción y dependencia de las variables y la evaluación de los efectos de las innovaciones se realizan acompañándolas de simulaciones con el modelo de manera que se pueda observar la dinámica del sistema en el tiempo (Sterman, 2000).

El análisis con ayuda de la simulación permite comprender de manera detallada el comportamiento dinámico del sistema, los procesos y la estructura que lo produce, así como las variables que participan del proceso.

Sterman (2000) plantea que el proceso de construcción de un modelo basado en la dinámica de sistemas es posible, y no es probable construir una metodología que garantice la obtención de un modelo perfectamente apropiado al problema de análisis. Sin embargo, es precisamente la serie de actividades que deben ser obligatorias en el proceso de modelación, las cuales se muestran en su orden de planteamiento en la Figura 5.2. Es el método más empleado por aquellos que son leales a la teoría desarrollada en la dinámica de sistemas, aunque existen quienes se acercan por la vía de práctica a esta herramienta e ignoran algunos pasos y obvian algunos elementos, dando énfasis primordialmente a la reproducción de la realidad percibida en sus procesos de estudio.

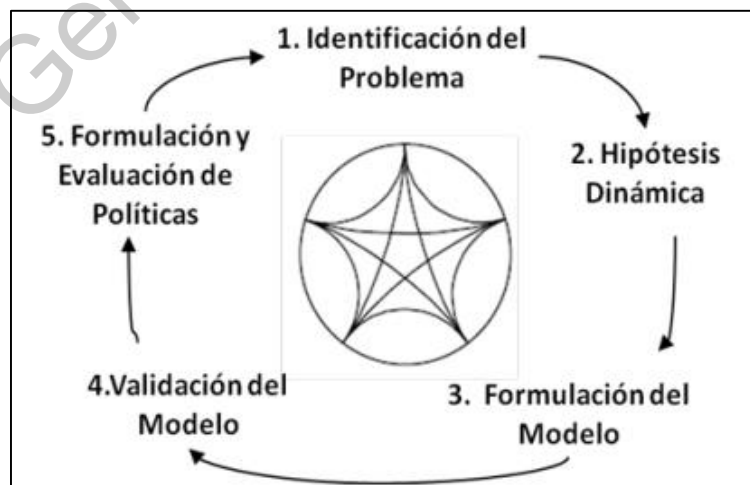


Figura 5.2. Proceso de modelación dinámica de sistemas.
Fuente: Sterman (2000)

El análisis de simulación dinámica pretende comprender la continuidad del desarrollo histórico de una aglomeración urbana, predecir su evolución futura, simular su condición de expansión y encontrar sus ventajas y desventajas (Sterman, 2000).

5.3.2.1 Matriz de transición de Markov

La cadena de Markov es un método para proyectar futuras demandas de uso del suelo mediante la determinación de la probabilidad de cambio de una categoría a otra, a partir de dos períodos de uso de suelo (Liang *et al.*, 2018).

Hablando informalmente, un proceso de Markov es un proceso aleatorio con la propiedad de que dado el valor actual del proceso X_t , los valores futuros X_s para $s > t$ son independientes de los valores pasados X_u para $u < t$. Es decir, que, si tenemos la información presente del proceso, saber cómo llegó al estado actual no afecta las probabilidades de pasar a otro estado en el futuro.

En general, las probabilidades de transición dependen no solo de los estados sino también del instante en el cual se efectúa la transición. Cuando estas probabilidades son independientes del tiempo (o sea, de n) se dice que la cadena tiene probabilidades de transición estacionarias u homogéneas en el tiempo.

En este caso $p_{ij}^{n+1} = p_{ij}$ no depende de n y P_{ij} es la probabilidad de que la cadena pase del estado i al estado j en un paso.

Se pueden colocar las probabilidades de transición en una matriz que será finita o infinita según el tamaño de ϵ . P se conoce como la matriz de transición o la matriz de probabilidades de transición de la cadena. La i -ésima fila de P para $i = 0, 1, \dots$ es la distribución condicional de X_{n+1} dado que $X_n = i$. Si el número de estados es finito, se dice k entonces P es una matriz cuadrada cuya dimensión es $k \times k$.

Un modelo de Markov no solo puede explicar la conversión entre los usos del suelo, sino también calcular las tasas de transferencia entre los diferentes tipos (Mitsova *et al.*, 2011).

La matriz de transición de Markov incluye una matriz de probabilidad y una matriz de valores de transferencia, las cuales se calculan a partir de mapas de uso de suelo en dos periodos distintos (Han y Jia, 2017).

$$p_{i,j} = \Pr(X_{t+dt} = i | X_t = j)$$

Donde:

$p_{i,j}$ Representa la probabilidad condicional de transición de i a j .

X_t Es el estado en el tiempo t

X_{t+dt} Es el estado en el tiempo $t+dt$, donde $\sum_{i=1}^n p_{i,j} = 1$

5.3.2.2 Pesos de evidencia (WoE)

Los pesos de evidencia (WoE) es una medida de cuánto la evidencia apoya o declina la hipótesis. WoE mide el riesgo relativo de un atributo de nivel de agrupación. El valor depende de si el valor de la variable de destino no es un evento o si lo es.

La técnica de pesos de la evidencia se ha utilizado, según Almeida *et al.* (2003), para estimar la importancia de los impulsores cualitativos y cuantitativos dentro del marco de modelado de Autómata Celular.

La relación entre las variables categóricas y la probabilidad de cambio se pueden establecer con el método de pesos de evidencia (Bonham-Carter, 1994).

$$WoE_{atributo} = \ln \frac{p_{atributo}^{no-evento}}{p_{atributo}^{evento} \frac{N_{atributo}^{no-evento}}{N^{total}}}$$

Donde:

$N_{no-evento}^{atributo}$ Es el número de registros sin cambios que exhibe la variable

$N_{no-evento}^{total}$ Es el número total de registros de sin cambios

$N_{evento}^{atributo}$ Es el número de registros de cambios que exhibe la variable

N_{evento}^{total} Es el número total de registros de cambios

5.3.3 Autómata celular

El estudio de sistemas cuya construcción es sencilla pero cuyo comportamiento resulta extremadamente complicado ha llevado a una nueva disciplina de estudio llamada teoría de sistemas complejos, en la cual los métodos computacionales juegan un papel central (Rechtman, 1991), uno de ellos es Autómata Celular (Ai-Ageili *et al.*, 2013).

Uno de dichos sistemas complejos es el Autómata Celular, el cual Wu (2002) define como un modelo dinámico discreto, representado por una cuadrícula de celdas, en las cuales las relaciones locales interconectadas exhiben cambios globales.

El modelado de crecimiento urbano basado en Autómata Celular ha atraído considerable atención en las últimas décadas (Lu *et al.*, 2013). Como un modelo dinámico discreto espacialmente explícito, Autómata Celular se aplica ampliamente a la simulación de sistemas complejos, como el modelado de crecimiento urbano y la simulación de procesos geográficos (Van Asselen y Verburg, 2013; Nugroho y Al-Sanjary, 2018).

Ilustrar la dinámica temporal del cambio de uso de suelo en dos periodos de tiempo y predecir el cambio futuro son dos utilidades del modelo de autómata

celular (Rahman *et al.*, 2017). Por lo tanto, autómata celular es un modelo dinámico para predecir el crecimiento urbano, según Al-kaissi y Hameed (2016).

En Autómata Celular, para modelar el entorno urbano, las características de cada celda pueden ser valores binarios (urbanos, no urbanos), valores cualitativos que representan diferentes usos de la tierra, valores cuantitativos que representan, por ejemplo, la densidad de población (Li *et al.*, 2003), nivel de desarrollo (Yeh y Li, 2002) o el valor de las construcciones (Cecchini y Rizzi, 2001), o un vector de varios atributos (Portugali y Benenson, 1995).

En el modelo de autómata celular, la cuadrícula representa el espacio y el tiempo mediante un avance uniforme. La unidad espacial más pequeña son las celdas y el estado es una característica que describe la celda para un espacio de tiempo particular. La cuadrícula explica la relación entre las células (Nugroho y Al-Sanjary, 2018).

Este modelo tiene una fuerte capacidad de predicción de la evolución espacial-temporal, se aplica comúnmente a la simulación espacial, como el crecimiento urbano (Shafizadeh-Moghadam *et al.*, 2017), la dinámica del uso del suelo (Dadashpoor y Nateghi, 2017), la predicción del uso del suelo (Dahal y Chow, 2014) y el cambio del uso del suelo (Liu *et al.*, 2017).

Para Santé *et al.* (2010) la principal fortaleza de los modelos basados en Autómata Celular es su capacidad para integrar el modelado de las dimensiones espaciales y temporales de los procesos urbanos. Sin embargo, la razón principal de la aceptación generalizada de estos modelos es su simplicidad.

5.3.4 Variables inducidas en los modelos

Los modelos de crecimiento urbano usan un conjunto de variables o factores para simular escenarios alternativos. Las variables se seleccionan de tal manera que puedan representar los escenarios de crecimiento urbano cercanos a los reales. Batty y Longley (1994) afirman que el crecimiento de las ciudades está

fuertemente influenciado por tres factores, a saber: restricciones económicas, limitaciones físicas y controles institucionales.

Del mismo modo, Angel *et al.* (2005) atribuyen a las diferencias de la forma de expansión urbana a seis tipos diferentes de efectos: el entorno natural; efectos demográficos; economía; sistema de transporte; las preferencias del consumidor para la proximidad; y los efectos del gobierno. Por lo tanto, Kanchanamala (2014) indica que la selección de variables apropiadas para el propósito específico del modelo es una tarea importante en el diseño del modelo para buscar mejores resultados.

En su revisión del estado del arte, Santé *et al.* (2010) encontraron que en la mayoría de los estudios que analizaron, se incluyen como variables el acceso vial (81%) y la distancia a los centros urbanos (50%). Los siguientes en frecuencia son la pendiente del terreno y el acceso al ferrocarril, seguidos de factores ambientales y de planificación, la idoneidad para el desarrollo y la densidad de población.

5.3.4.1 Coeficiente de correlación de Pearson

En estadística, el coeficiente de correlación de Pearson es una medida lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.

De manera menos formal, se puede definir el coeficiente de correlación de Pearson como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables siempre y cuando ambas sean cuantitativas y continuas.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice que se utiliza para medir el grado de relación de dos o más variables involucradas en cambios espaciales (Chernykh *et al.*, 2018).

$$p_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

Donde:

σ_{XY} = Es la covarianza de (X,Y).

σ_X = Es la desviación estándar de la variable X.

σ_Y = Es la desviación estándar de la variable Y.

5.3.5 Validación de modelos

El método de validación más simple consiste en la evaluación visual de mapas reales y modelados, y generalmente se complementa con métodos cuantitativos que evalúan la precisión general. Para este propósito, Santé *et al.* (2010) sugieren las medidas más frecuentes en un orden creciente de complejidad, las cuales se enuncian a continuación:

- 1) Razón de simulación a número real de celdas (o conglomerados) para un uso del suelo dado,
- 2) Precisión global, es decir, el porcentaje de píxeles correctamente clasificados,
- 3) Análisis de regresión entre resultados de simulación y datos reales, y
- 4) Índice kappa.

5.3.5.1 Coeficiente Kappa (K)

El Coeficiente Kappa de Cohen es una medida estadística que ajusta el efecto del azar en la proporción de la concordancia observada para elementos cualitativos (variables categóricas).

En general se cree que es una medida más robusta que el simple cálculo del porcentaje de concordancia, ya que K tiene en cuenta el acuerdo que ocurre por azar.

El coeficiente Kappa mide la concordancia entre dos conjuntos de datos (mapas) basados en la distribución de tamaños de clase (Van Vliet *et al.*, 2011).

$$k = \frac{\text{Pr}(a) - \text{Pr}(e)}{1 - \text{Pr}(e)}$$

Donde:

Pr (a) Es la probabilidad de que se produzca concordancia.

Pr (e) Es la probabilidad de que dicha concordancia se produzca al azar.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

6. METODOLOGÍA

6.1 Diagrama de metodología

Mediante la Figura 6.1 se presentan los pasos que se siguieron para desarrollar la investigación. Después, se describen a detalle cada una de las actividades.

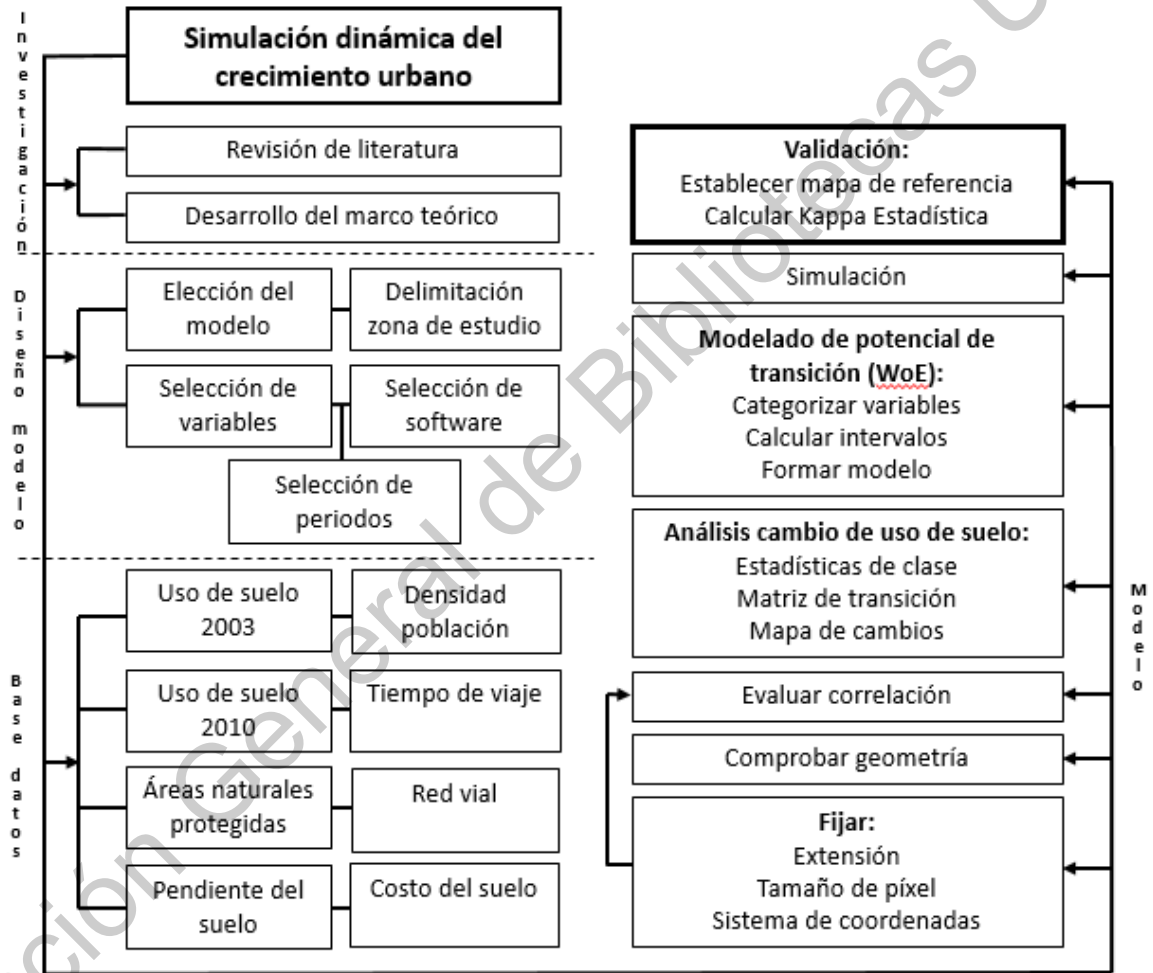


Figura 6.1 Diagrama metodológico.

6.2 Revisión de la literatura y desarrollo del marco teórico.

Proceso en el cual se realizó investigación del estado del arte referente al tema de modelación de crecimiento de ciudades, también se analizó la teoría detrás de los métodos y técnicas involucrados.

Después de revisar la literatura y consultar los datos existentes, se decidió aprovechar los datos clave y disponibles en su mayoría en dominio público por parte de INEGI.

6.3 Desarrollo del diseño de investigación.

6.3.1 Definición del modelo utilizado, a partir de la Tabla 2.1.

El modelo que mejor explica el crecimiento urbano de una ciudad de México es simulación dinámica, ya que su función principal es modelar en el tiempo y en las direcciones que se le solicite, además que admite una mayor cantidad de variables, además de su facilidad de modelar con ayuda de SIG.

6.3.2 Definición del área de estudio.

El crecimiento urbano es uno de los fenómenos que enfrentan los países desarrollados y en vías de desarrollo. El crecimiento urbano está influenciado básicamente por una tasa creciente de crecimiento económico. Con el crecimiento económico creciente, automáticamente los niveles de ingresos comienzan a aumentar. Y eso alentará el crecimiento de la población en las zonas urbanas, así como el poder de atraer a las personas a vivir en la ciudad. Por lo que, para Nugroho y Al-Sanjary (2018), una ciudad objeto de estudio en el ámbito de modelación de crecimiento urbano debe pertenecer a un país en desarrollo o vías de desarrollo.

Sin embargo, hay causas específicas responsables del crecimiento urbano, por ello se debe evaluar su presencia en el caso de estudio para elegir si es apto o no para un modelo de simulación de crecimiento urbano. En la Tabla 6.1 se indican cuáles son dichos factores según Bhatta (2010).

Tabla 6.1 Factores de crecimiento urbano para evaluar en modelos de simulación.

Factor
Crecimiento poblacional
Crecimiento económico
Industrialización
Especulación
Expectativas de vistas
Invasiones
Disputas legales
Impuesto a la propiedad
Alto costo de vida y propiedad
Falta de vivienda asequible
Demanda de más espacio habitable
Regulación pública
Problemas de transporte
Vialidades cortas
Vivienda unifamiliar
Familias núcleo
Mercado de crédito
Políticas gubernamentales de desarrollo
Falta de políticas de planificación
Deseo de vivir en áreas verdes
Inversión en vivienda
Gran tamaño de lote

En su estudio, Göbel (2015), expone que la Zona Metropolitana de Querétaro presenta diversos factores tales como industrialización, crecimiento poblacional, crecimiento económico, especulación, falta de vivienda asequible, problemas de transporte, falta de políticas de planificación e impuestos, lo cual son características de una ciudad apta para ser caso de estudio en un modelo de predicción de crecimiento urbano.

Debido a lo anterior, el área de estudio fue la Zona Metropolitana de Querétaro

(ZMQ), comprendida actualmente por los municipios de Querétaro, Corregidora, El Marqués y Huimilpan (correspondientes al estado de Querétaro); y, Apaseo el Alto (correspondiente al estado de Guanajuato). Se muestra la ZMQ en la Figura 6.2.

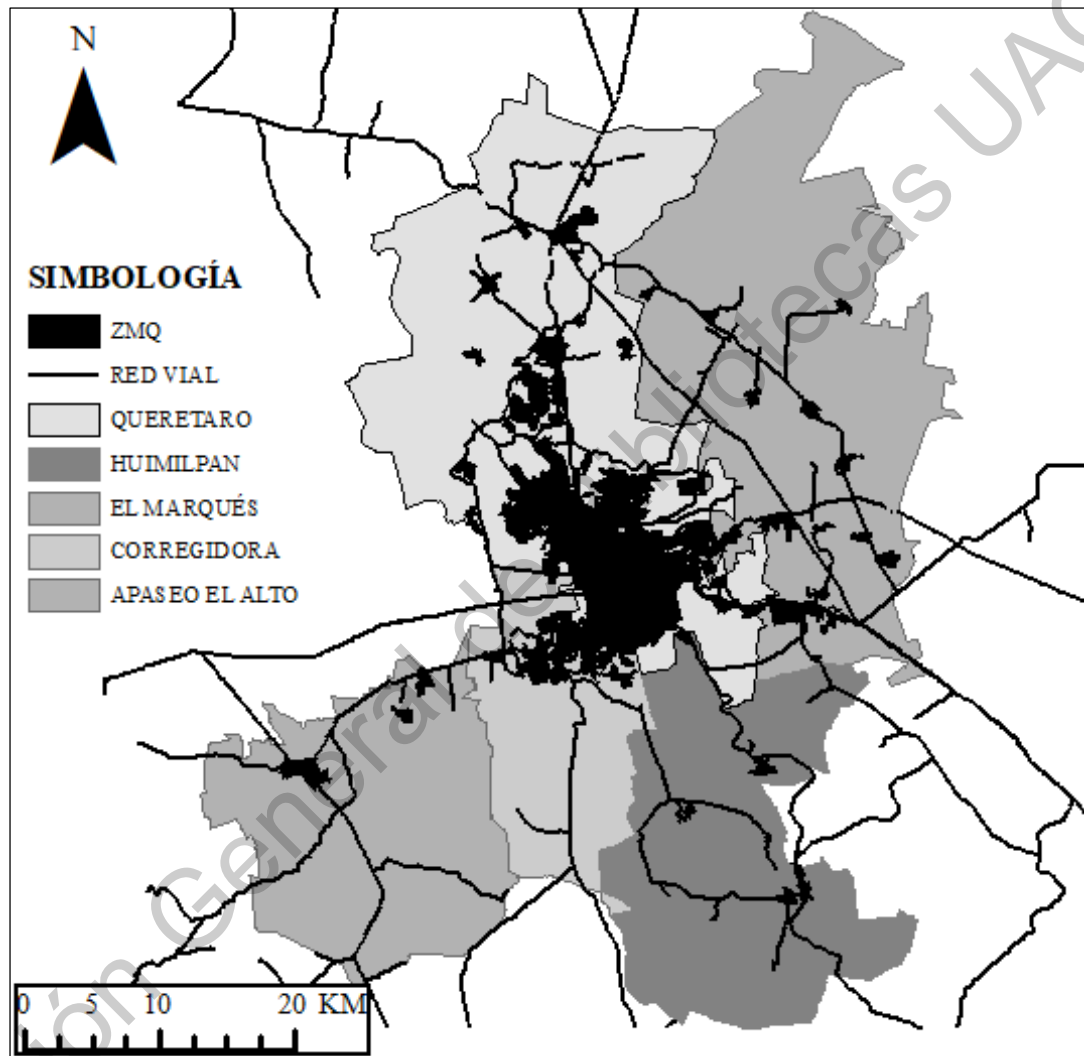


Figura 6.2 Zona Metropolitana de Querétaro

6.3.3 Búsqueda y fijación de las variables que se involucran en el objeto de estudio.

Con ayuda de la bibliografía consultada y la observación de las características físicas y fenómenos que han propiciado el crecimiento de la zona metropolitana, se establecieron las siguientes variables:

Uso de suelo del año 2003 y 2010 (US_2003 y US_2010), pendiente del suelo (PEN), áreas naturales protegidas (ANP), densidad poblacional (DEN_POB), red vial (VIA), costo de suelo (PRC_S) y tiempo de traslado del centro hacia la periferia (ISO_AC5).

6.3.4 Establecimiento del software a emplear.

El tipo de software empleado debe ser un sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), debido a que la información a tratar debe ser mostrada espacialmente. ArcGis es el programa que se utilizó para depurar y tratar la información de las variables debido a su versatilidad en el tratamiento de la información. QGis es el software en el que se ejecutó el modelo ya que es el que lo contiene en su plataforma como un *Plug-in*.

6.3.5 Establecimiento del periodo de medición o de estudio.

El periodo de pronóstico para el modelo fue para 21 años, empezando en el 2017 y terminando en el 2038, generando mapas a cada 7 años. Un punto importante es que tomando en cuenta los periodos administrativos gubernamentales, que en el caso de nuestro país están íntimamente ligados con el desarrollo de las ciudades, el periodo anteriormente mencionado es relevante.

6.4 Adquisición de datos.

6.4.1 Uso de suelo.

Esta información se obtuvo en formato *shape* del sitio de internet de INEGI, en el apartado de recursos naturales. Se descargó la información perteneciente al año 2003 y 2010, que son los años en que se evaluó el crecimiento urbano para trabajar el modelo.

Como se obtiene el mapa de uso potencial del suelo de todo el país, se procedió a recortar el área de interés, la cual, es la comprendida entre los cinco municipios que conforman la Zona Metropolitana.

En el software ArcMap, con ayuda de la herramienta *clip* de la utilidad *geoprocesing*, se realizó la tarea de recortar el mapa general de usos de suelo para el área de estudio y se guardó en formato *ráster*.

Los usos de suelo se generalizaron en 7 categorías debido a que el archivo de INEGI proveía tipos de agricultura y tipos de urbanización según el caso, quedando la siguiente clasificación: Agricultura (AGR), cuerpo de agua (AGU), área urbana (AUR), bosque (BOQ), matorral y pastizal (MAP), y selva baja caducifolia (SBC), quedando los mapas como se muestran en la Figura 6.3 y Figura 6.4.

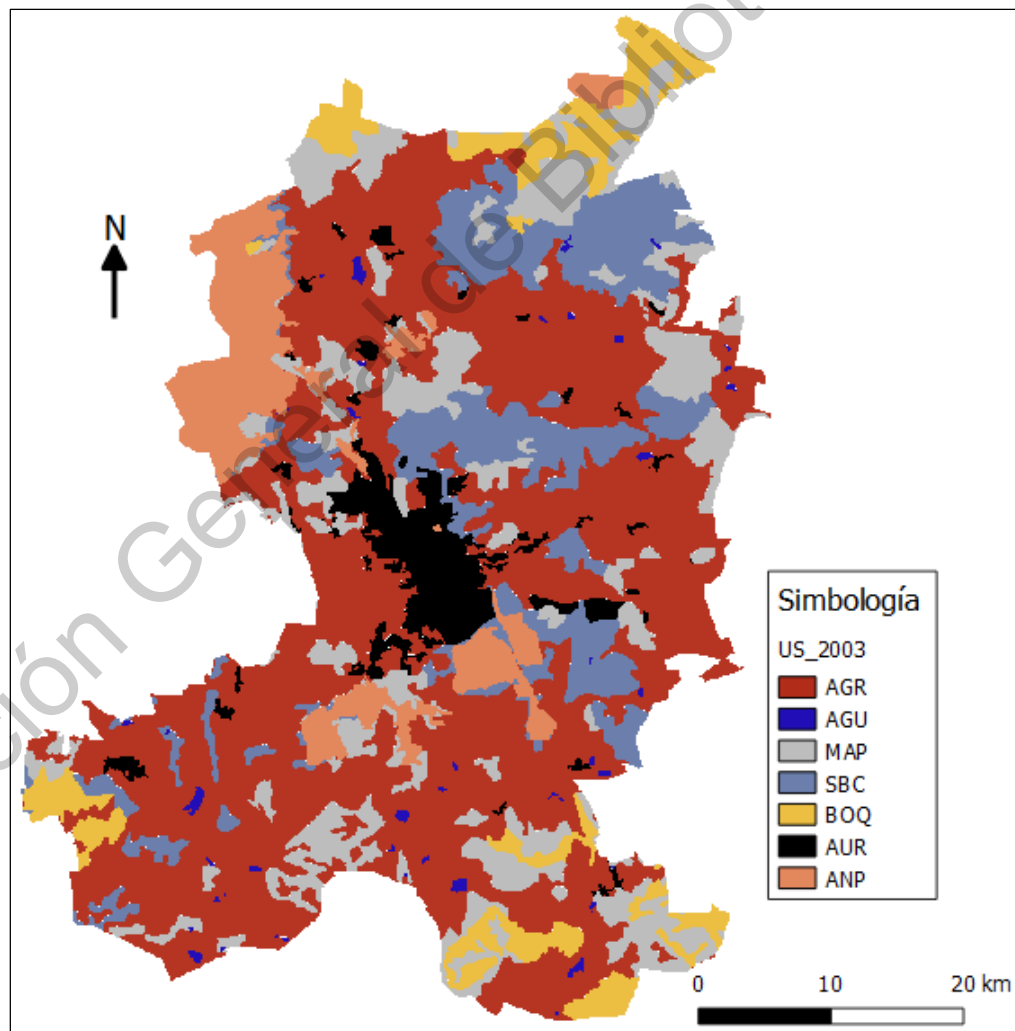


Figura 6.3 Distribución de uso de suelo en 2003.

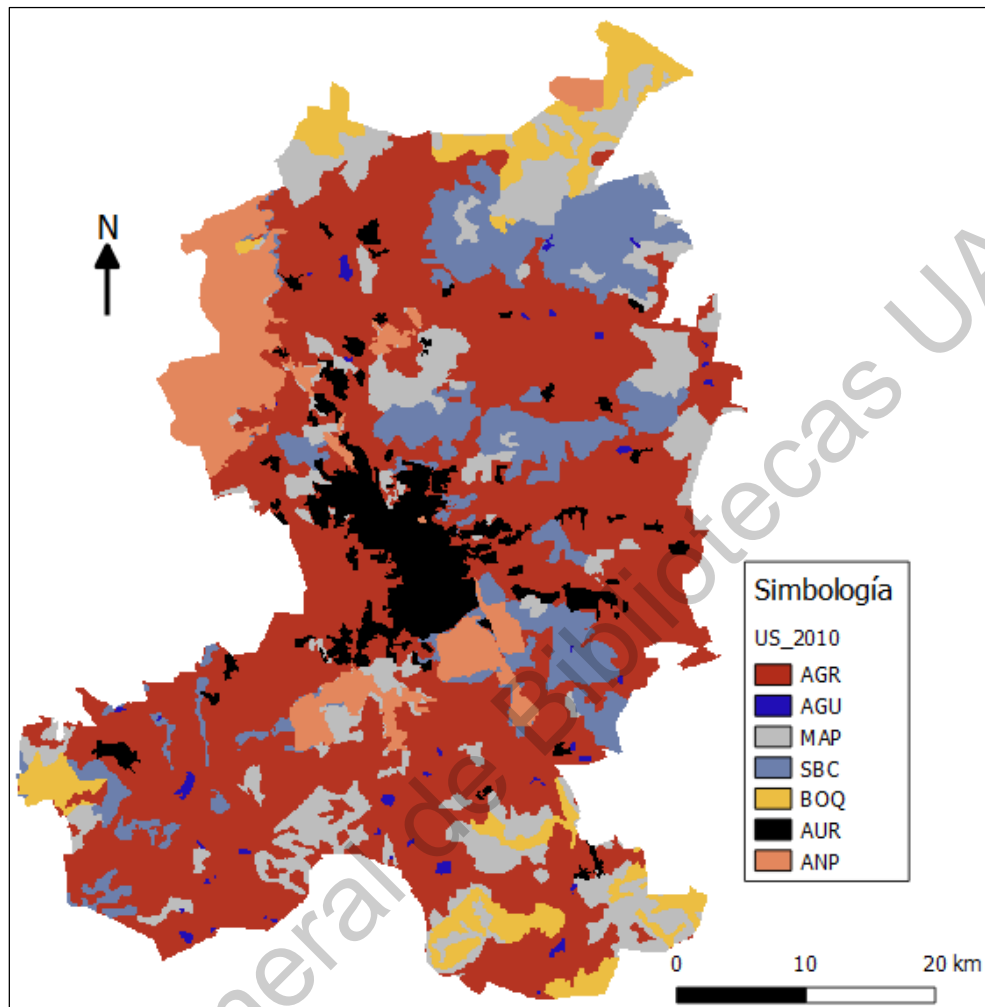


Figura 6.4 Distribución de uso de suelo en 2010.

6.4.2 Áreas naturales protegidas

Del sitio de internet de la Secretaría de Desarrollo Sustentable de Querétaro (SEDESU), en el apartado del Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del Estado de Querétaro (POEREQ) se obtuvieron las áreas naturales protegidas de competencia federal y local del estado de Querétaro. Cabe mencionar que en los dos municipios de Guanajuato que forman parte de la ZMQ no existen áreas naturales protegidas.

Los archivos descargados se encontraban en formato *kmz*, por lo que se convirtieron a formato *shape*. Con la herramienta *KML to layer*, de la utilería

ArcToolBox, se convirtieron los archivos a *layer* para posteriormente convertirlos a formato *shape*.

Los polígonos de cada área natural protegida se incluyeron en los mapas de uso de suelo, para formar parte de la clasificación de suelo en el área de estudio. Estos polígonos no deben presentar cambio alguno en su área debido a que son áreas protegidas, se muestran en la Figura 6.5.

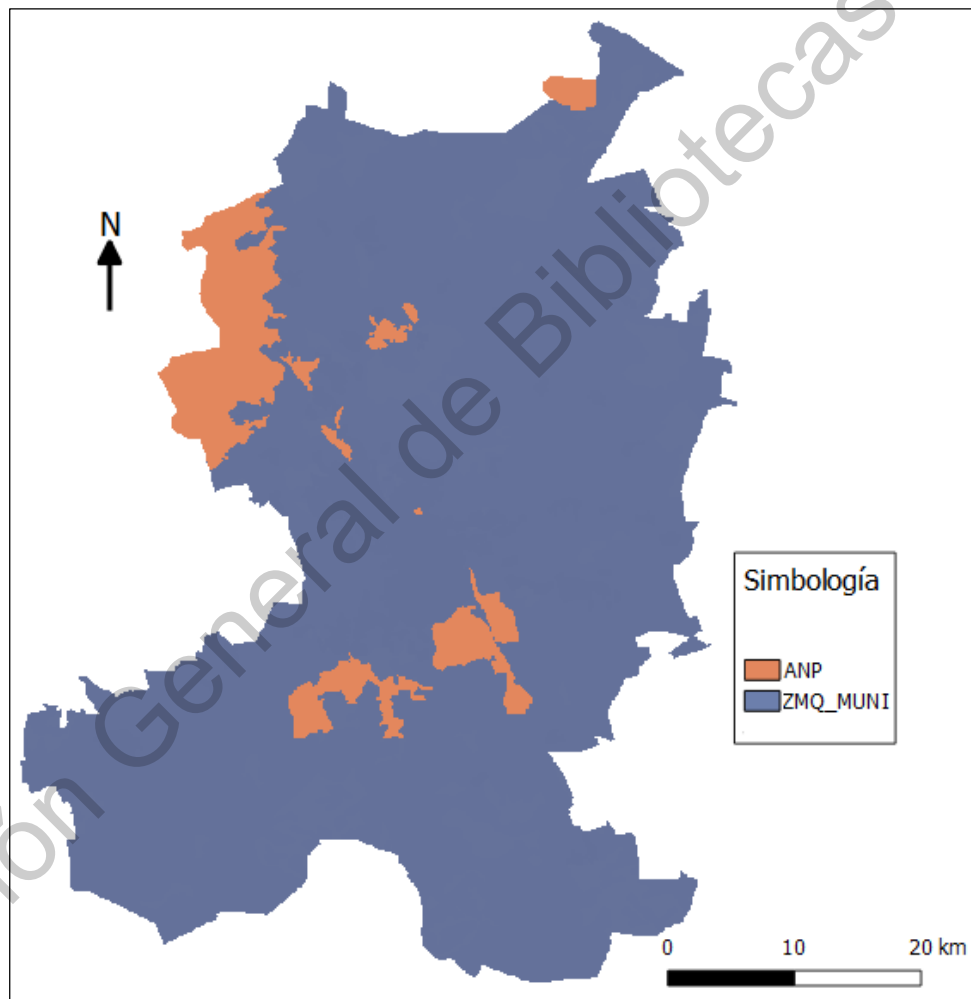


Figura 6.5 Áreas naturales protegidas.

6.4.3 Pendiente del suelo

Del sitio de internet de INEGI, en el apartado de geografía, se buscaron los

modelos digitales de elevación correspondientes al área de estudio. Dichos modelos se encuentran en formato *ráster*.

En el software ArcMap, con ayuda de la herramienta *mosaic to new raster* de la utilería *ArcToolBox*, se unieron los modelos digitales de elevación en un solo archivo. Del archivo único de modelo digital de elevación, se obtuvo un mapa de pendientes. Esto se logra con la herramienta *slope* de la utilería *ArcToolBox*. El mapa de pendientes se guardó en formato *ráster*.

El archivo de pendientes en *ráster* se cortó con ayuda de la máscara generada por el contorno de los municipios pertenecientes a la Zona Metropolitana de Querétaro, quedando tal como se muestra en la Figura 6.6.

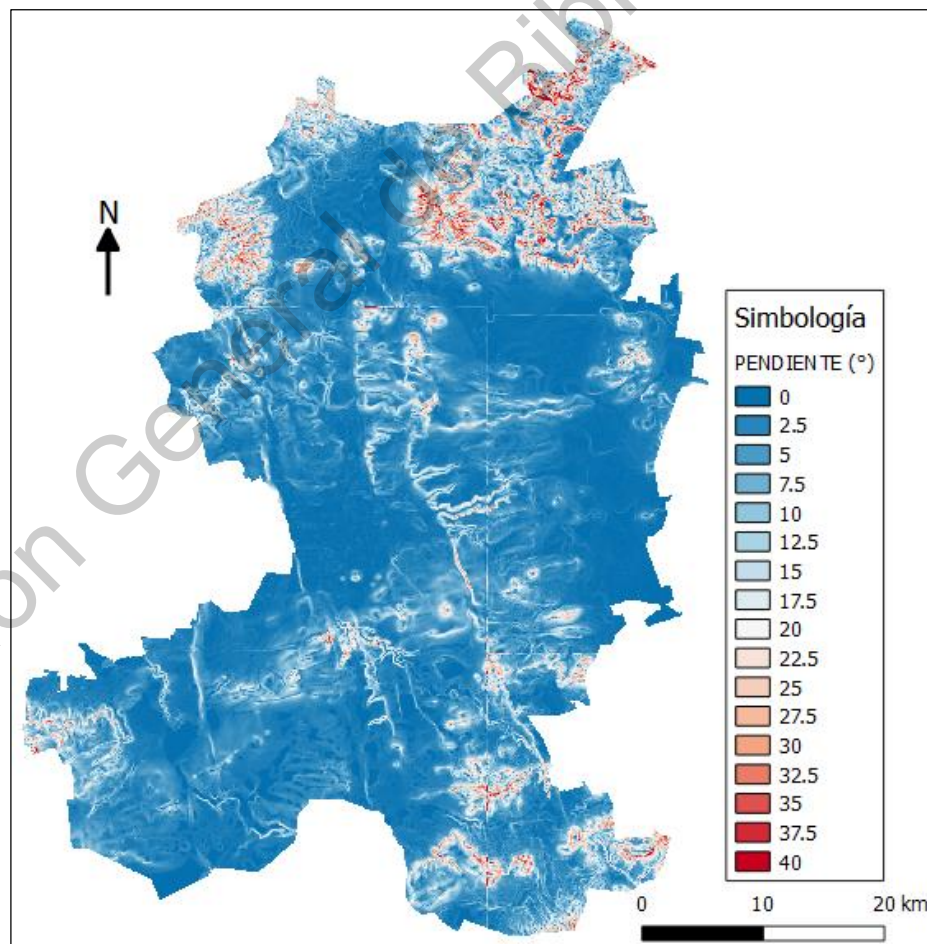


Figura 6.6 Distribución de pendientes.

6.4.1 Densidad de población

Este parámetro se obtuvo con ayuda de datos del INEGI, del censo de población y vivienda se obtuvo la población total por AGEBS, se concentró todo en una tabla de Excel. Dicha tabla se adjuntó a la tabla de propiedades del archivo shape que contiene los AGEBS del año 2010.

Con el comando *joins and relates*, se unió la tabla de población a la tabla de propiedades de los AGEBS, posteriormente se calculó el área en km² con *calculate geometry*, y se creó otra columna para calcular la densidad de población dividiendo la columna de población entre la columna de área, para así obtener una densidad poblacional para cada AGEBS y en las unidades hab/km².

Obtenida la densidad de población, se creó un archivo *ráster* mediante el comando *polygon to raster* de la utilidad *conversion tools*, para así tener esta variable en el formato necesario. El mapa quedó como se ilustra en la Figura 6.7.

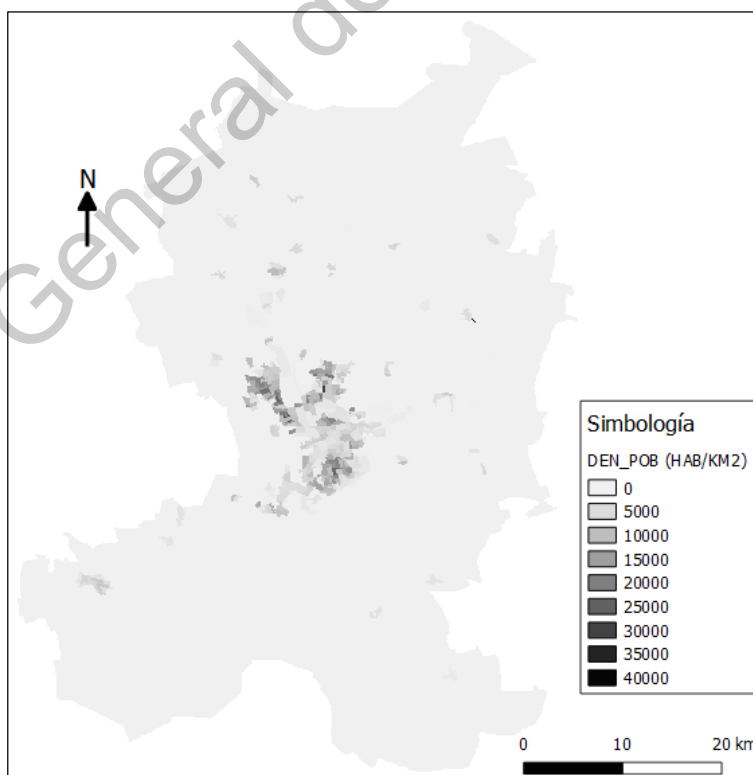


Figura 6.7 Distribución de densidad poblacional.

6.4.2 Tiempo de viaje del centro a la periferia

De estudios de movilidad ya realizados por la Universidad Autónoma de Querétaro, se obtuvieron las isócronas de tiempo a cada 5 minutos en el software TransCAD con ayuda de la utilería *network bands*. El archivo saliente se exportó en formato *shape*.

En ArcMap el archivo *shape* se convirtió en formato *ráster* con ayuda del comando *polygon to raster* de la utilería *conversion tools*, para así tener esta variable en el formato necesario. A su vez, se cortó con ayuda de la máscara generada por el contorno de los municipios pertenecientes a la Zona Metropolitana de Querétaro, el mapa se ilustra en la Figura 6.8.

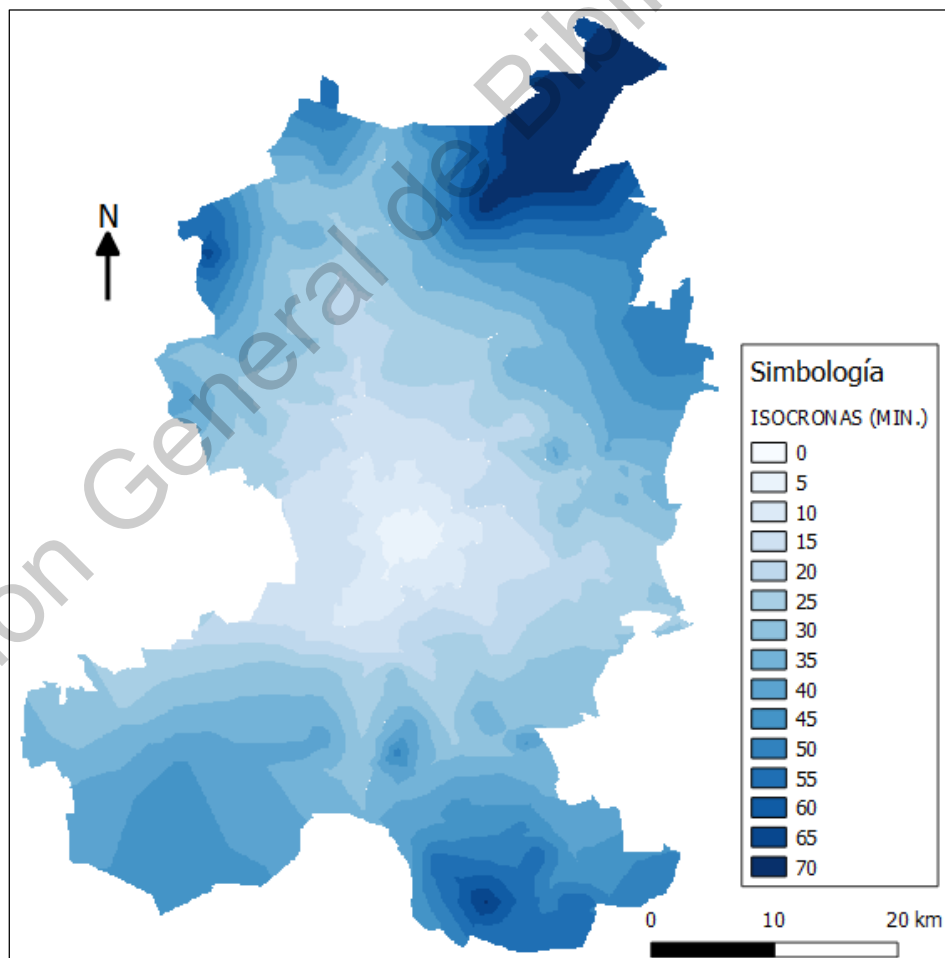


Figura 6.8 Isocronas de tiempo a cada 5 minutos.

6.4.3 Red vial

Del sitio de internet de INEGI, en el marco geo estadístico nacional, se obtuvieron los archivos en formato *shape* de los ejes de vialidad de cada municipio que conforma la ZMQ.

Posteriormente se generaron mapas *ráster* con las polilíneas que conforman la red vial de la ZMQ. Se cortaron los mapas con ayuda de la máscara del contorno de los municipios pertenecientes a la ZMQ, quedando como se ilustra en la Figura 6.9.

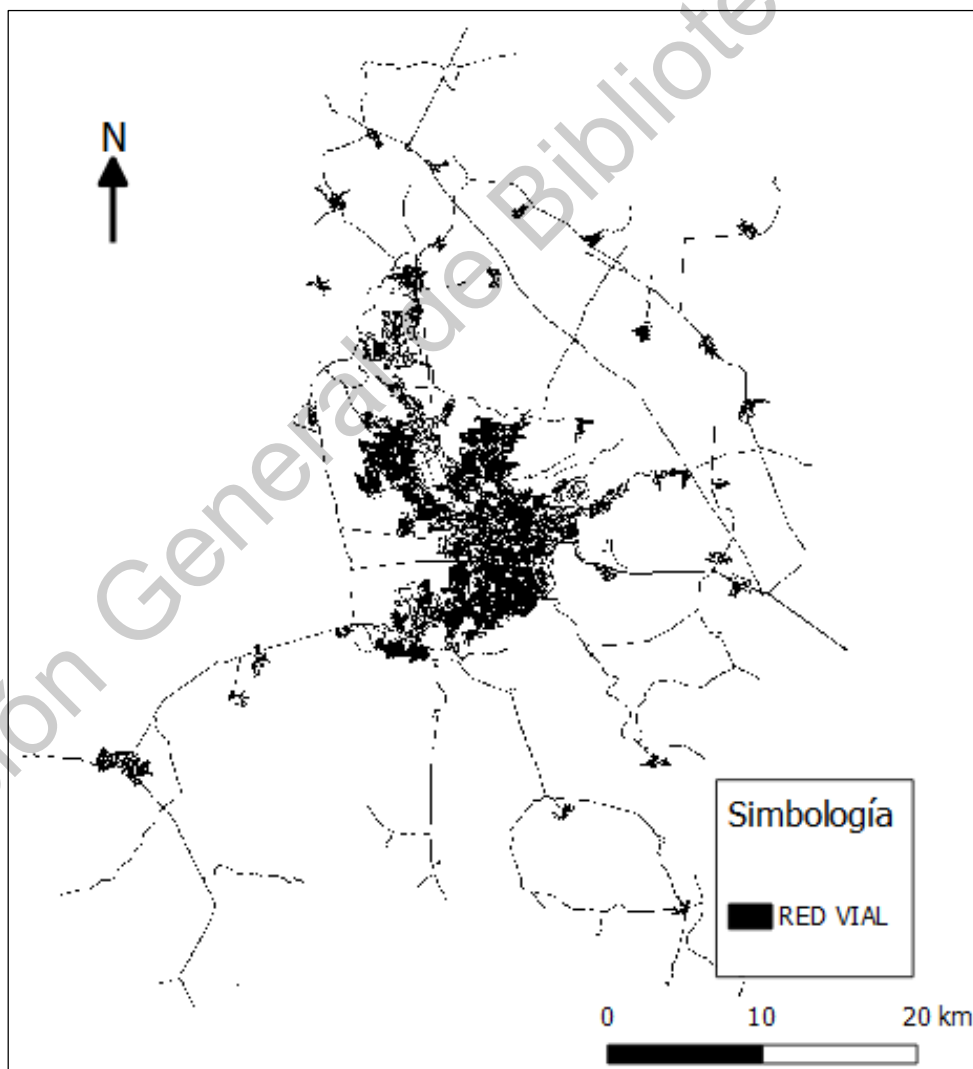


Figura 6.9 Red vial de la ZMQ.

6.4.4 Costo del suelo

Los datos de costo de uso de suelo fueron obtenidos de la tabla del decreto por el que se aprueban las tablas de valores unitarios de suelo y construcciones de los municipios del estado de Querétaro para el ejercicio fiscal 2011. Esta publicación fue publicada por el periódico oficial del estado de Querétaro “La sombra de Arteaga”.

Estas tablas se convirtieron a formato xls, para así, editar el archivo. A cada valor correspondiente a una calle o lado de calle, se le asignó la clave del AGEB, para posteriormente obtener un valor promedio por cada AGEB.

La tabla de atributos del archivo shape de AGEBS se editó creando un nuevo campo y editándolo para insertar la información correspondiente al valor promedio por cada AGEB.

Generada la información, se creó un archivo *ráster* mediante el comando *polygon to raster* de la utilidad *conversion tools*, para así tener esta variable en el formato necesario. El mapa de la distribución del precio de suelo promedio por AGEB queda tal como se muestra en la Figura 6.10.

6.5 Modelación

6.5.1 Fijación de parámetros de entrada

Los mapas del periodo inicial (2003) y final (2010) de uso de suelo, así como los correspondientes a las demás variables que se fijaron en el modelo, deben contener el mismo sistema de coordenadas, el mismo tamaño de píxel y la misma extensión.

La información del cambio de uso de suelo y las variables espaciales se utilizaron para modelar y simular los cambios de uso de suelo. En este paso se verificó la geometría de todos los archivos *ráster* de entrada, para asegurar que todos los mapas se igualaron bajo los requerimientos geométricos.

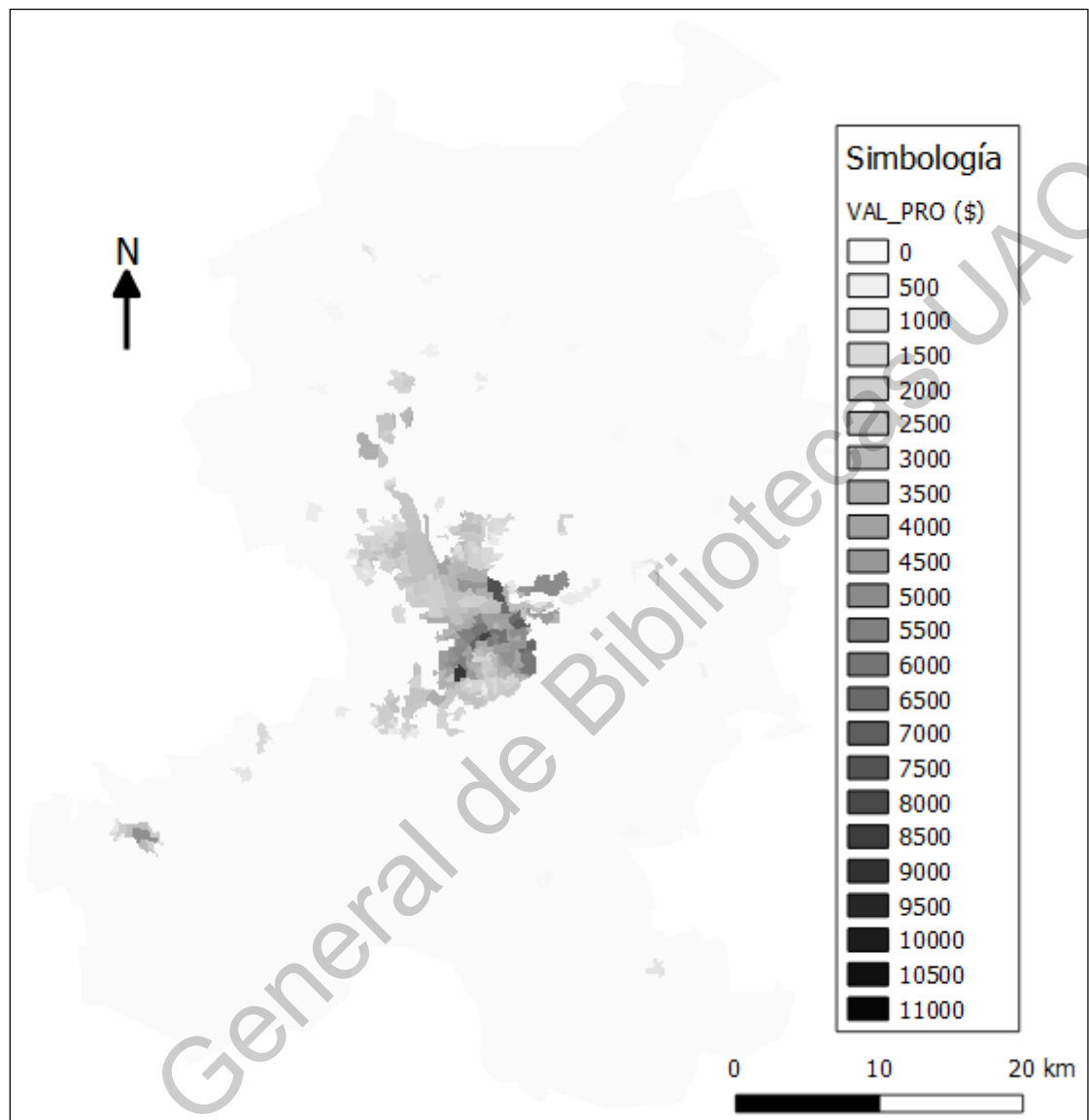


Figura 6.10 Distribución del costo de suelo de suelo por AGEB.

6.5.2 Evaluación de correlación de variables

En este paso se obtuvo una tabla mediante el método de correlación de Pearson, el cual es ampliamente utilizado para verificar la correlación entre las variables espaciales. Para que una variable guarde correlación con otra, es necesario que el coeficiente sea positivo, ya que un coeficiente negativo indica que no se tiene relación una variable con otra.

6.5.3 Análisis de cambio de uso de suelo

El análisis de cambio de uso de suelo se obtuvo mediante una tabla en la cual se calculó la cantidad de cambio, dependiendo las unidades que pueden ser m², km² o unidad píxel; a su vez, se expresan en porcentajes de igual manera. Dichos valores son calculados con base a el área comprendida en la zona de estudio.

Similarmente se obtuvo una tabla que contiene la probabilidad de que un tipo de uso de suelo cambie a otro, ésta tabla se llama matriz de transición y está basada en la Cadena de Markov.

6.5.4 Modelación de potencial de transición

El método de pesos de evidencia o *Weights of evidence* fue el utilizado para modelar y calibrar el potencial de transición de un tipo de suelo a otro. Éste método se aplica siempre y cuando las variables sean categóricas, por lo que, si en algún mapa existen valores mayores a 100, es decir, val.max>100, se deben categorizar las variables.

En este caso los mapas que no estaban categorizados por la cantidad de información que contenían eran los pertenecientes a las variables de densidad de población, pendiente del suelo y costo del suelo.

La Tabla 6.2 muestra cómo se realizó la distribución de rangos para cada variable.

Dicha información se colocó en el apartado de *transition potential model*, en el cual se colocaron los valores correspondientes a número de intervalos y la tabla automáticamente calculó los rangos.

Tabla 6.2 Tabla de rangos para categorización de variables

VARIABLE	RANGO MIN	RANGO MAX	NUMERO DE INTERVALOS	RANGOS
DEN_POB	0	46953	94	500,1000, 1500, 2000, 2500...
PEN	0	54	27	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19...
PRC_S	0	1084	54	200, 400, 600, 700, 800, 1000...

6.5.5 Simulación

En este proceso se obtuvieron dos productos: un mapa de certeza y un mapa simulado. El primero indica gráficamente la certeza que existe en lo que se simuló, los valores son de 0 a 100 y se expresa en porcentaje. El segundo mapa es el generado por la simulación, el cual es un mapa de uso de suelo pronosticado para el año 2017. La simulación está basada en el algoritmo de Monte Carlo, el cual viene incluido en el *plug-in*.

6.5.6 Validación

El proceso de validación se llevó a cabo mediante la estadística Kappa (Kappa estándar, Kappa histograma y Kappa localización). Con ayuda de un mapa de uso de suelo correspondiente al año 2017, en formato *ráster*, obtenido del sitio web de INEGI, se generó la validación del mapa simulado correspondiente al mismo año.

6.5.7 Generación de pronósticos faltantes

Por último, teniendo validado el modelo bajo un resultado aceptable, se procedió a generar los demás pronósticos, en éste caso para los años 2024, 2031 y 2038, es decir, a cada 4 años. El proceso a seguir es el descrito desde el punto 6.5.3 hasta el 6.5.5, en el *plug-in* se puede indicar la cantidad de iteraciones para generar el pronóstico para el año solicitado.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la plataforma de QGis se obtuvieron los siguientes resultados que permitieron la predicción del crecimiento urbano de la Zona Metropolitana de Querétaro.

7.1 Evaluación de correlación de variables

La relación de correlación entre cinco variables (VIA = red vial, ISO_AC5 = tiempo de viaje del centro a la periferia, DEN_POP = densidad de población, PEN = pendiente del suelo y PRC_S = precio promedio del suelo) y el uso de suelo en dos periodos (US_2003 y US_2010) se muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Correlación de Pearson entre las variables espaciales

	VIA	US_2010	ISO_AC5	DEN_POB	PEN	US_2003	PRC_S
VIA	--	0.1391	-0.1953	0.3924	-0.0932	0.0820	0.3278
US_2010		--	0.0405	0.2803	0.4024	0.9341	0.3174
ISO_AC5			--	-0.2734	0.3841	0.0689	-0.3345
DEN_POB				--	-0.0853	0.2313	0.5759
PEN					--	0.4193	-0.1020
US_2003						--	0.2567
PRC_S							--

Respecto a la correlación existente entre el uso del suelo y las variables, es necesario indicar que se presenta una correlación positiva, siendo el valor más bajo el tiempo de viaje del centro a la periferia (0.0405) y el más alto la pendiente del suelo (0.4193). Debido a que el tiempo de viaje desde el centro a la periferia no es muy significativo en el crecimiento de ciudades que presentan una dispersión urbana importante, en nuestro modelo hay muy poca relación de esta variable, sin embargo, es positivo.

La pendiente es un indicador muy importante ya que el terreno plano se utiliza principalmente para la agricultura y para urbanizar, mientras que el terreno escarpado permanece en su estado natural la mayor parte del tiempo, por lo tanto, la pendiente presenta una alta correlación respecto al uso del suelo.

Algo que es evidente es la correlación existente entre los usos del suelo, ya que los cambios ocurridos en siete años no son muy grandes con respecto al área.

Algunas correlaciones negativas presentes son las relacionadas con la red vial, la densidad de población y el precio de la tierra, porque algunas variables no tienen relación una con otras, por ejemplo, las carreteras pueden existir en cualquier pendiente del suelo y el valor del suelo no depende de la densidad de la población.

7.2 Cambio de uso de suelo de 2003 a 2010

El impacto en la composición y configuración del uso del suelo en el pasado en la Zona Metropolitana de Querétaro se muestra en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Distribución y cambio de área de tipo de uso de suelo 2003 y 2010.

Uso de suelo	Cambios de área					
	2003 (km ²)	2010 (km ²)	Δ (km ²)	2003 (%)	2010 (%)	Δ (%)
AGR	1236.5700	1280.6600	44.0900	51.1189	52.9415	1.8226
MAP	373.6000	326.8200	-46.7800	15.4444	13.5106	-1.9338
ANP	195.1000	195.1000	0.0000	8.0653	8.0653	0.0000
SBC	318.4000	291.6300	-26.7700	13.1625	12.0558	-1.1066
AUR	122.6700	164.3500	41.6900	5.0710	6.7942	1.7232
AGU	13.6900	13.2500	-0.4400	0.5658	0.5477	-0.0181
BOQ	158.9800	147.1900	-11.7900	6.5721	6.0848	-0.4873
Σ	2419.0100	2419.0000	0.0000	100.0000	100.0000	0.0000

La política de urbanización y desarrollo integral de los gobiernos locales ha contribuido significativamente al rápido cambio de uso de suelo en esta región. Es evidente que los campos de agricultura, principalmente, y las grandes áreas

urbanas, en segundo lugar, han reemplazado las áreas naturales dentro del período de estudio. Las áreas agrícolas de 1236.57 km² en 2003 incrementaron a 1280.66 km² en 2010, y el promedio de cambio fue de 1.82%, lo que equivale a 44.09 km².

Por otro lado, las áreas urbanas incrementaron de manera similar con un porcentaje total de 1.72%, lo que equivale a 41.69 km², de 122.67 km² en 2003 a 164.35 km² en 2010. Mientras tanto, los cuerpos de agua disminuyeron en un porcentaje muy pequeño (0.018%); matorrales y pastizales un 1.93%, selva baja caducifolia un 1.1% y el bosque, con 0.48% también disminuyó. Estos cambios se aprecian mejor en la Figura 7.1, donde el color negro expresa un aumento de área y el color gris una disminución.

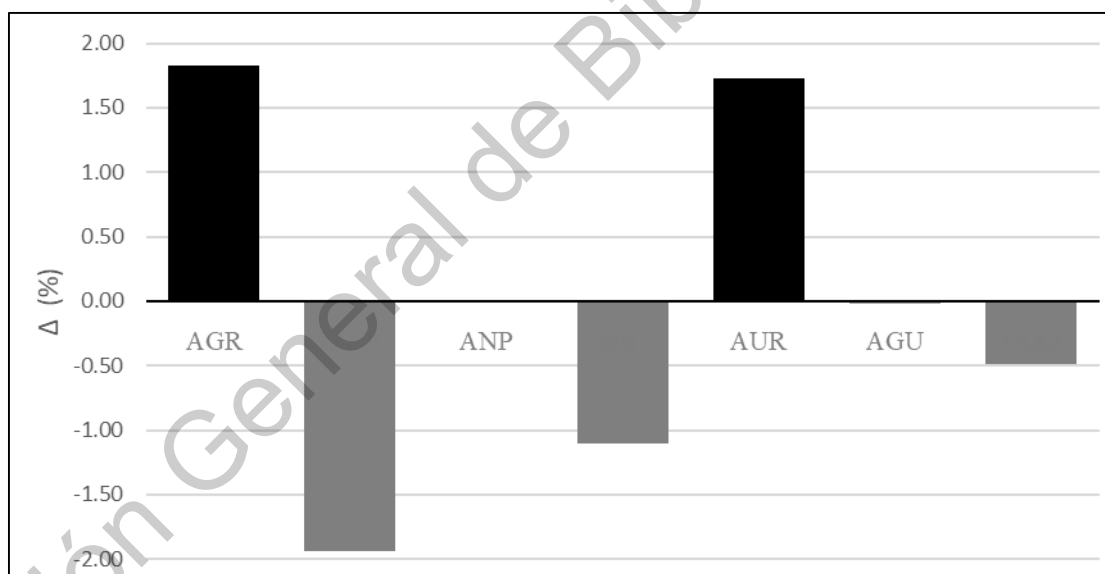


Figura 7.1 Cambio de uso / cobertura del suelo de 2003 a 2010.

En cuanto a los cambios concierne, la Tabla 7.2 indica los diferentes porcentajes de cada cambio en el uso del suelo entre 2003 y 2010. En general, todos los usos de suelo presentan diferentes tendencias de cambios. Los campos agrícolas y las áreas urbanas, respectivamente, aumentaron, eliminando los otros usos de suelo, excepto las áreas naturales, que deben permanecer en el mismo estado.

La Tabla 7.3 muestra la matriz de transición que presentó la sustitución del uso del suelo por otro. Las mayores probabilidades de cambio son respecto a los campos agrícolas y las áreas urbanas, mientras que las probabilidades más bajas se presentaron en los cuerpos de agua, dejando de lado las áreas naturales protegidas.

Tabla 7.3 Matriz de transición de cambio de uso de suelo entre 2003 y 2010

	AGR	AGU	MAP	SBC	BOQ	AUR	ANP
AGR	0.9767	0.0000	0.0020	0.0011	0.0007	0.0195	0.0000
AGU	0.0274	0.9680	0.0000	0.0000	0.0000	0.0046	0.0000
MAP	0.1043	0.0000	0.8469	0.0045	0.0015	0.0428	0.0000
SBC	0.0898	0.0000	0.0018	0.8971	0.0000	0.0113	0.0000
BOQ	0.0186	0.0000	0.0461	0.0184	0.9168	0.0000	0.0000
AUR	0.0163	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9837	0.0000
ANP	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

El área agrícola ha sido reemplazada por otros usos del suelo, como el área urbana (1.94%) y el matorral de pastos (0.20%). En el caso de las áreas urbanas, han surgido principalmente de matorral y pastizal (4.27%), agricultura (1.94%) y selva baja caducifolia (1.12%). Los cuerpos de agua se han mantenido constantes y no se han convertido en otros usos y no se han expandido. Las áreas protegidas se mantuvieron sin cambios desde 2003 hasta 2010, por lo que su probabilidad de cambio es cero.

Los aspectos demográficos y la política de desarrollo integral han provocado una alta competencia en el desarrollo del tipo de uso de suelo y han creado complejidad en la región de estudio, lo que se suma a una amenaza inminente para la disminución del área de las áreas naturales protegidas. Paralelo al auge del desarrollo residencial es la expansión de las áreas institucional, industrial y comercial, de transporte, infraestructura y servicios públicos.

Lo descrito anteriormente se muestra en la Figura 7.2, donde a cada cambio de uso del suelo en el período de estudio se asigna un color para ser identificado. El cambio inclinado hacia el área urbana en el centro del mapa es distinguible.

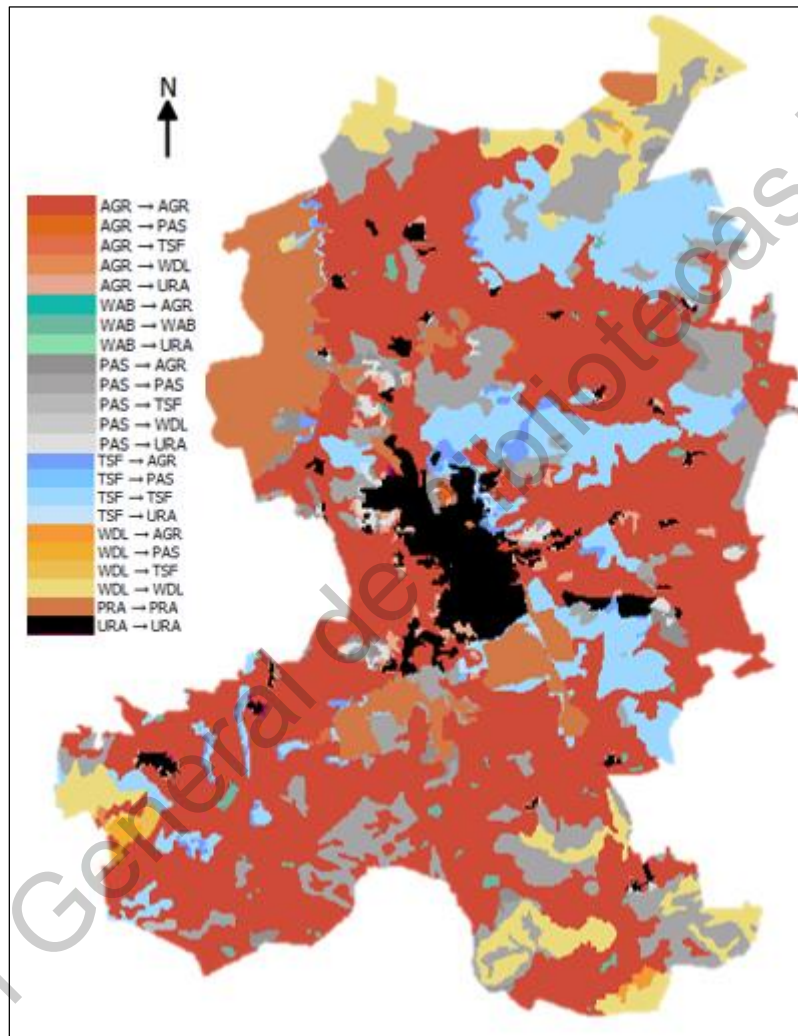


Figura 7.2 Cambio de área entre 2003 y 2010.

7.3 Modelado de potencial de transición

La utilización del método de *Weights of evidence (WoE)* permite categorizar las variables que están en modo continuo, para esto fue necesario establecer rangos entre los valores existentes en cada variable.

En el caso de la densidad de población, se estableció un rango de 500 habitantes/km², la pendiente del suelo a cada 2 grados y el precio del suelo a cada 200 pesos mexicanos. Estos rangos se establecieron con base en la experimentación, con el rango que obtendría una mejor precisión en el modelo.

No fue necesario categorizar las otras variables porque ya lo estaban y el método indica categorizar si: valor máximo = 100. La Tabla 7.4 muestra los rangos con los que se categorizaron las variables continuas.

Tabla 7.4 Tabla de rangos para categorización de variables

VARIABLE	RANGO MIN	RANGO MAX	NUMERO DE INTERVALOS	RANGOS
DEN_POB	0	46953	94	500,1000, 1500, 2000, 2500...
PEN	0	54	27	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19...
PRC_S	0	1084	54	200, 400, 600, 700, 800, 1000...

7.4 Simulación

Con el fin de predecir las posibles tendencias futuras y cambios en el área de estudio. La simulación de Autómata Celular, basada en el cambio de uso del suelo entre 2003 y 2010, utilizó *Weights of Evidence* (WoE) para pronosticar los futuros cambios en la dispersión de la mancha urbana.

El resultado indica que las áreas urbanas aumentarán considerablemente y los campos agrícolas aumentarán en menor medida que en el pasado. Las razones de estos cambios son que el método se basa en el cambio previo en píxeles desde el año 2003 al 2010. También este método es ayudado por las variables espaciales que se utilizaron, como la pendiente del suelo, el precio del suelo, red vial, entre otros.

La Figura 7.3 muestra la distribución de uso del suelo pronosticado, su predicción es que la agricultura aumentará un poco y cubrirá alrededor del 54.76% del área

de estudio en 2017, y la zona urbana cubrirá alrededor del 7.8%, mientras que el resto del uso de la tierra disminuirá en diferente magnitud.

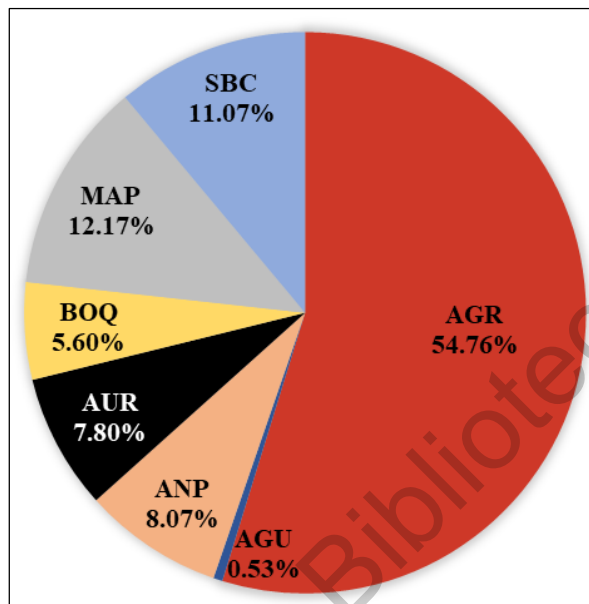


Figura 7.3 Composición del uso de suelo para el año pronosticado 2017.

Se creó un mapa de certidumbre, que se muestra en la Figura 7.4, en el que un rango variable es visible debido a la naturaleza de los datos. Se percibe que existe una gran área que incluye alta certidumbre, del 80 al 100% alrededor de donde se localiza la ZMQ, que es la zona objeto de estudio.

En la Figura 7.5 un histograma muestra que el rango de certeza de 85 a 100% ocurre con más frecuencia en el mapa, lo cual es un indicador de la precisión del modelo.

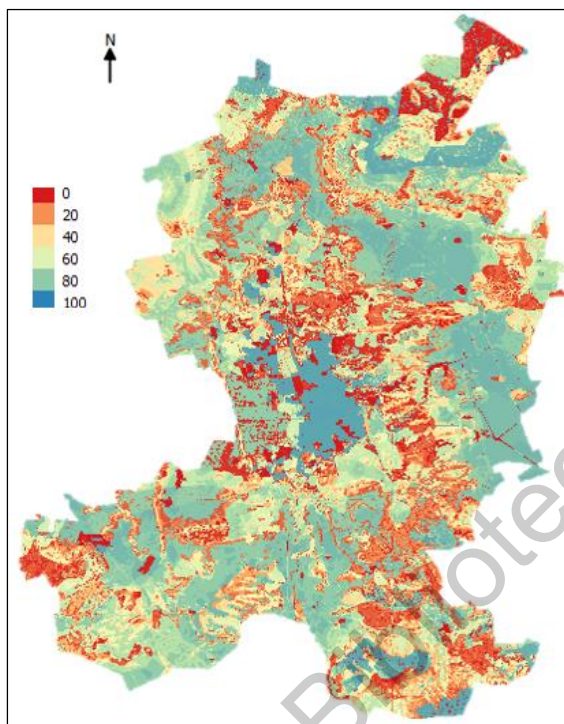


Figura 7.4 Mapa de confiabilidad.

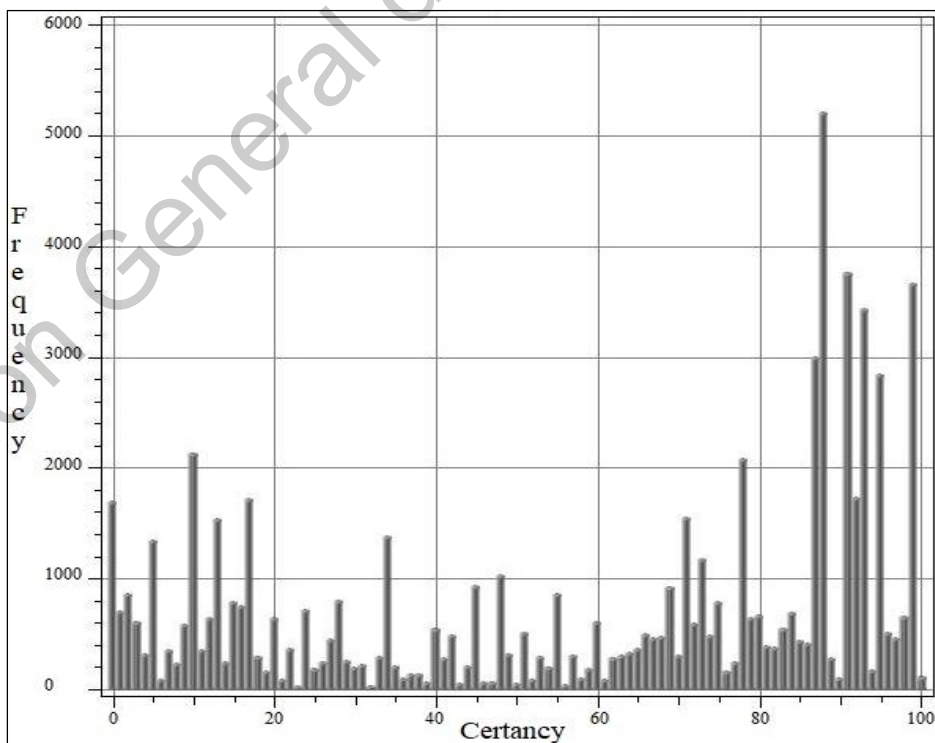


Figura 7.5 Histograma de mapa de confiabilidad.

La Figura 7.6 muestra el mapa del producto de la simulación, en el que se puede apreciar el crecimiento del área urbana en color negro, siguiendo los patrones de crecimiento históricos.

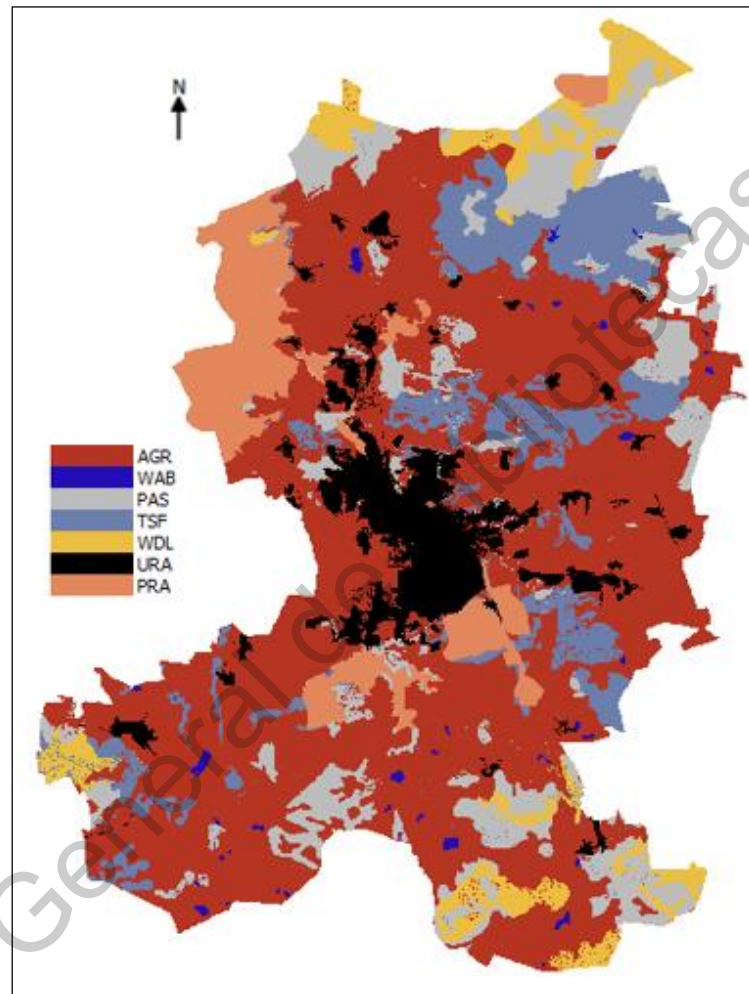


Figura 7.6 Mapa de simulación para el año 2017.

7.5 Tendencia del crecimiento urbano

El crecimiento de la ciudad se ha debido a varios factores, los más importantes se incluyeron en este estudio, basado en el crecimiento urbano suscitado entre los años 2003 y 2010 se pronosticó la mancha urbana de la ZMQ para 4 períodos (2017, 2024, 2031 y 2038), los resultados se muestran en la Figura 7.7, así como el crecimiento urbano histórico en el mismo intervalo de tiempo desde 1989.

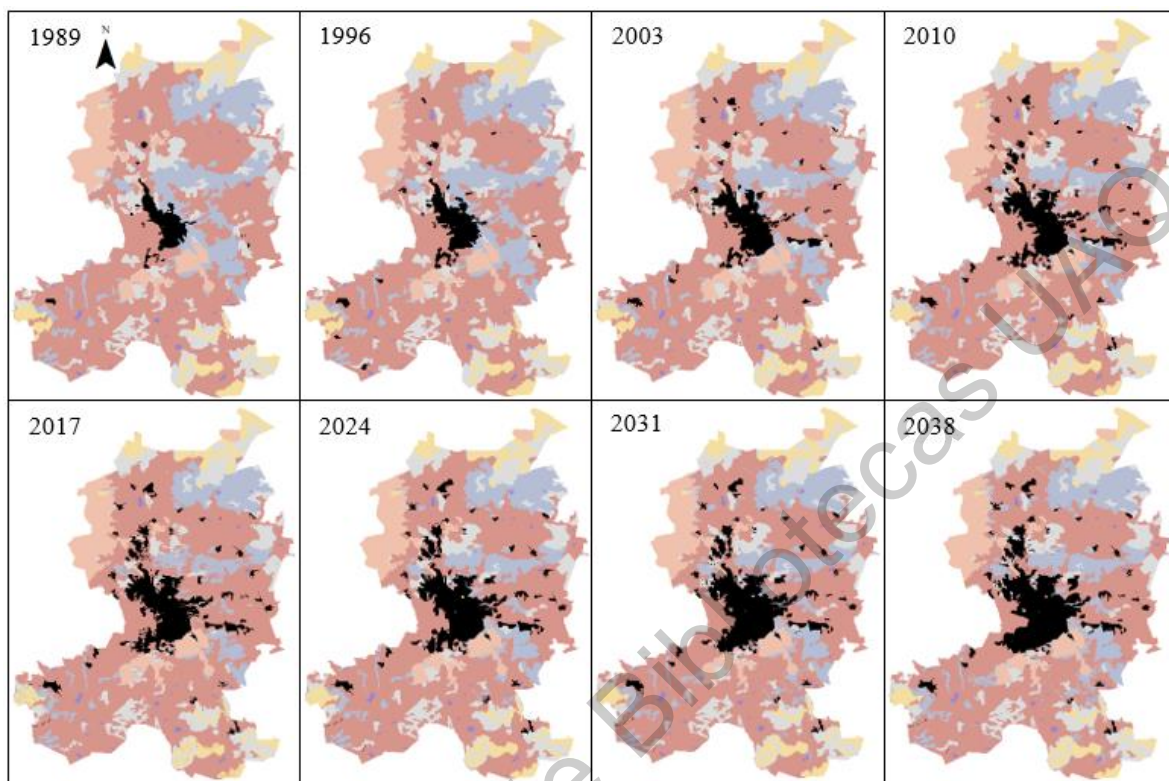


Figura 7.7 Crecimiento urbano histórico y predicho.

Del mismo modo, estos resultados se muestran en la Figura 7.8 donde el crecimiento, tanto histórico como predicho, se superponen para identificar áreas donde se ha generado y se generará más crecimiento.

Las áreas donde la ciudad tiende a crecer son principalmente: al Oeste en el área plana del municipio de Corregidora y el área de Cerrito Colorado en el municipio de Querétaro, al Norte entre Jurica y Juriquilla en el municipio de Querétaro, al Este en la zona Milenio-Mirador y Pradera-refugio en el municipio de El Marqués, al Sur en el área de Candiles y libramiento Sur-Poniente, también en el Sur hubo un crecimiento histórico hasta la cima con las áreas naturales protegidas de El Cimatario y El Tangano. Las comunidades vecinas que forman parte del área metropolitana permanecen con pocos cambios ya que históricamente no han crecido mucho, excepto el pueblo de Santa Rosa Jáuregui.

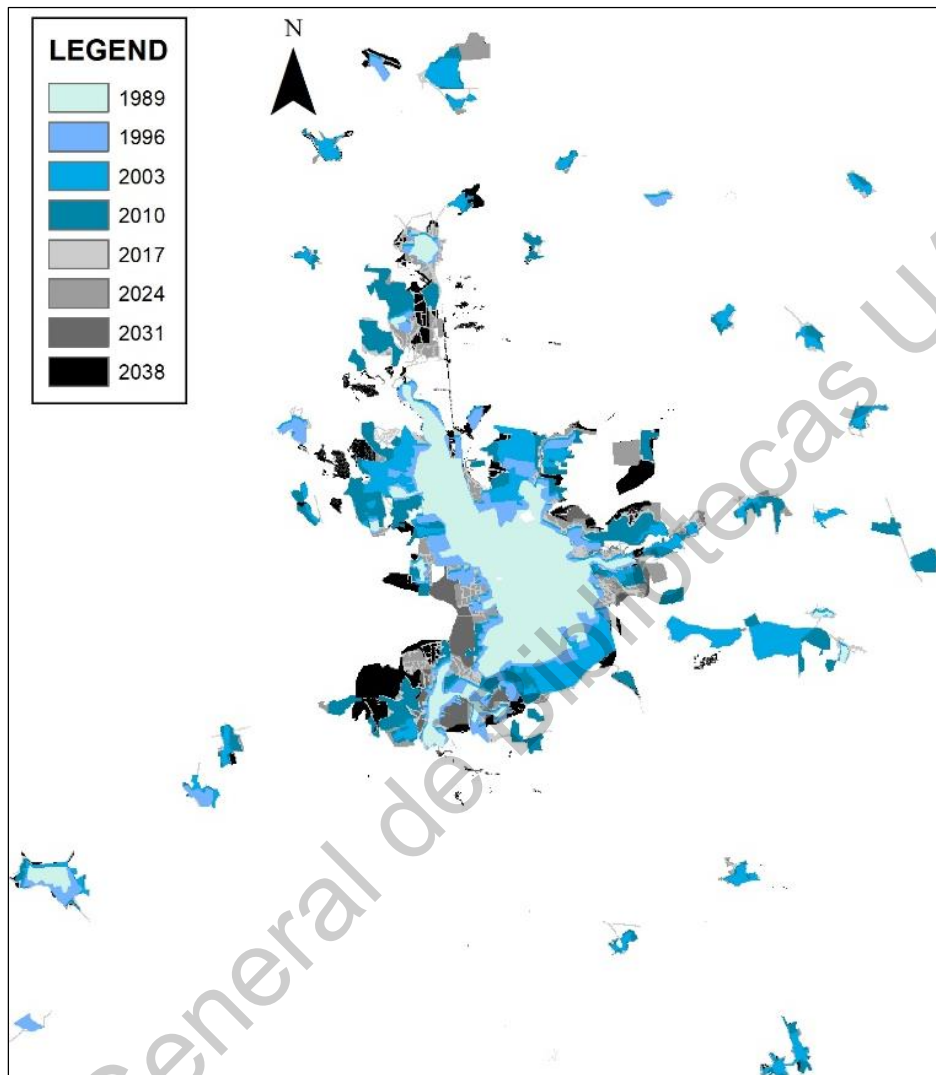


Figura 7.8 Crecimiento urbano sobrepuesto.

La Figura 7.9 muestra un gráfico que presenta la tendencia de crecimiento del área urbana, desde lo histórico hasta lo predicho. Desde 2017, se espera un crecimiento promedio anual de 9.34%. Se agregó una línea de tendencia, encontrando un R^2 de 0.96, lo que nos da certeza del pronóstico de crecimiento.

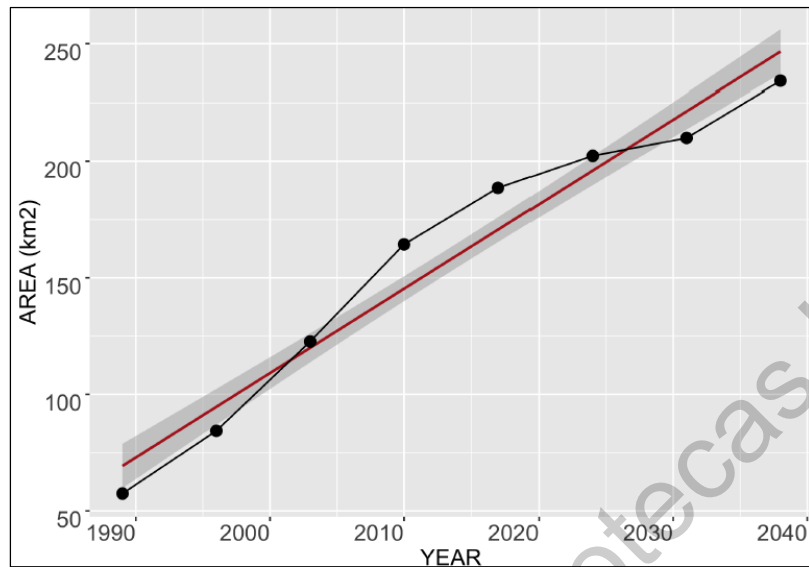


Figura 7.9 Crecimiento del área urbana de la ZMQ.

7.6 Validación

La estadística Kappa se usa frecuentemente para probar la precisión de modelos. La importancia de la confiabilidad del evaluador radica en que representa la medida en que los datos recopilados en el estudio son representaciones correctas de las variables medidas. Para validar el modelo, se utilizó un mapa de uso de suelo correspondiente al año 2017 (Figura 7.10), con el que se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 7.5. El porcentaje de precisión es el que corresponde a Kappa en general, que es de 91.42%, por lo que se acepta el modelo, ya que el mínimo debe ser del 80% de precisión.

Tabla 7.5 Parámetros de validación del modelo

Parámetro	%
Precisión	94.23
Kappa (overall)	91.42
Kappa (histo)	94.75
Kappa (loc)	96.48

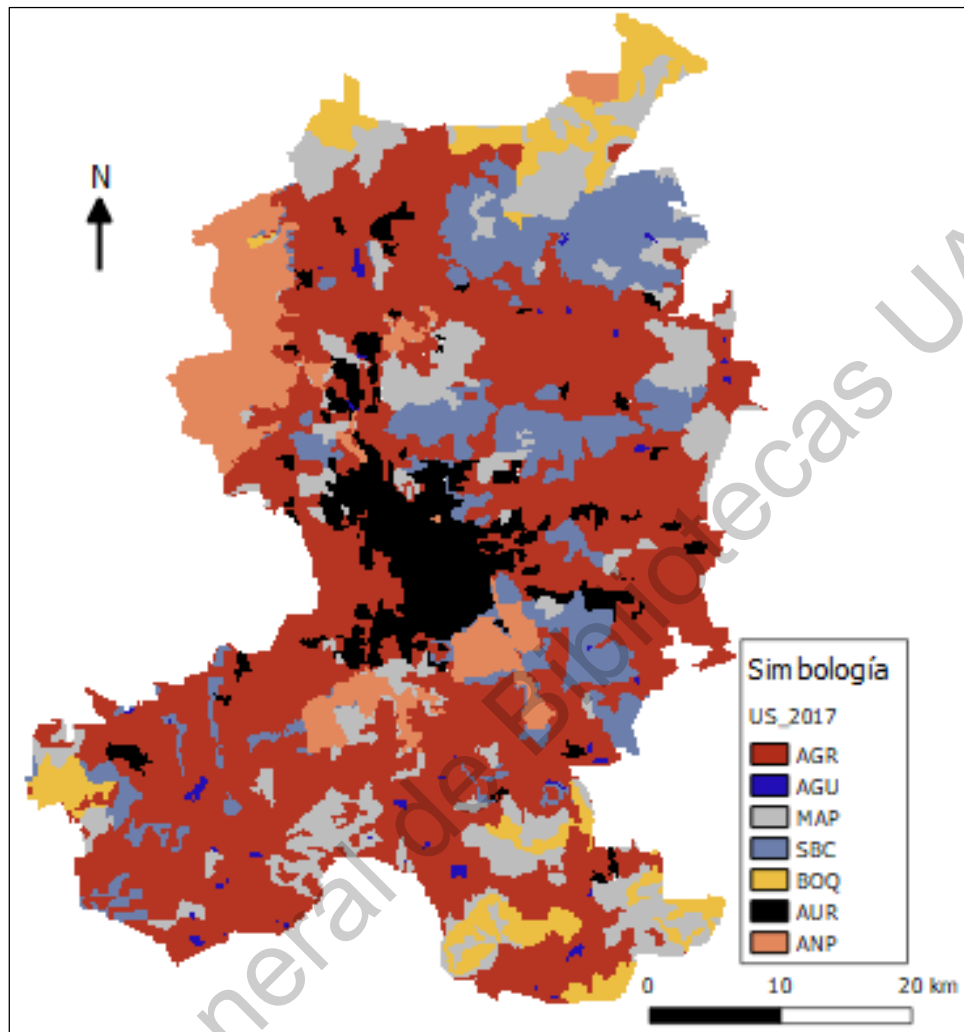


Figura 7.10 Mapa de uso de suelo año 2017.

7.7 Resultados con cambio de magnitudes de variables

En este apartado se muestran y discuten los resultados que se obtuvieron cuando se realizó el proceso de exploración de magnitudes de las distintas variables (las que lo permiten). Dichas variables son: distancia a vialidades (que como no resultó significativa, no se utilizó en el modelo final), tiempo de viaje del centro a la periferia, densidad de población y precio de suelo.

Los resultados que se afectan, difiriendo del actual, al experimentar con las magnitudes y los rangos de las variables son: Evaluación de correlación entre variables y la tendencia de crecimiento urbano, ya que a su vez el porcentaje de validación se afectó al modificar las magnitudes de las variables. El cambio de uso de suelo no se ve afectado ya que teniendo los mismos mapas base no influyen las demás variables

En la Tabla 7.6 se muestra el resultado de todos los experimentos realizados con los cambios de magnitud en la cual se ilustra como resultado concreto de ello los porcentajes de validación del modelo.

Tabla 7.6 Resultados de experimentos

Experi- mento	Variabes	PRC_S./Rangos	Kappa (%)	Experi- mento	Variabes	PRC_S./Rangos	Kappa (%)
1	VIA	-	90.10	10	VIA	-	89.90
	ISO_AC5	-			ISO_AC5	5	
	PRC_S	200			PRC_S	200	
	PEN	1			PEN	3	
	DIST_V	-			DIST_V	-	
2	VIA	-	89.86	11	VIA	-	89.99
	ISO_AC5	5			ISO_AC5	5	
	PRC_S	200			PRC_S	500	
	PEN	1			PEN	2	
	DIST_V	100			DIST_V	-	
3	VIA	-	89.70	12	VIA	-	90.01
	ISO_AC5	5			ISO_AC5	5	
	PRC_S	500			PRC_S	1000	
	PEN	1			PEN	2	
	DIST_V	50			DIST_V	-	
4	VIA	-	89.60	13	VIA	-	89.99
	ISO_AC5	5			ISO_AC5	5	
	PRC_S	100			PRC_S	300	
	PEN	1			PEN	2	
	DIST_V	200			DIST_V	-	
5	VIA	-	89.73	14	VIA	-	90.24
	ISO_AC5	5			ISO_AC5	5	
	PRC_S	200			PRC_S	200	
	PEN	1			PEN	2	
	DIST_V	40			DIST_V	-	
6	VIA	-	88.96	15	DEN_POP	500	91.30
	ISO_AC5	10			VIA	5	

Continuación

Experi- mento	Variables	PRC_S./Rangos	Kappa (%)	Experi- mento	Variables	PRC_S./Rangos	Kappa (%)
6	PRC_S	5420	88.96	6	ISO_AC5	5	91.30
	PEN	26			PRC_S	200	
	DIST_V	2000			PEN	2	
7	VIA	-	DIST_V		-		
	ISO_AC5	5	DEN_POP		500		
	PRC_S	200	16	VIA	5	91.29	
	PEN	1		ISO_AC5	5		
DIST_V	-	PRC_S		200			
8	VIA	-		PEN	2		
	ISO_AC5	5	DIST_V	-			
	PRC_S	500	DEN_POP	1000			
	PEN	1	17	VIA	-	91.42	
DIST_V	-	ISO_AC5		5			
9	VIA	-		PRC_S	200		
	ISO_AC5	5		PEN	2		
	PRC_S	200	DIST_V	-			
	PEN	2	DEN_POP	500			
9	DIST_V	-	90.01				

De la anterior tabla se concluye que mediante la inclusión de todas las variables establecidas en metodología se logra una mayor precisión del modelo, considerando que:

- La variable de distancia a vialidades desde su evaluación en correlación se obtuvo un valor negativo, sin importar la magnitud que se considerara (50,100, 200, 1000).
- Con las isócronas de tiempo de viaje del centro a la periferia a cada 5 minutos, el modelo mostró un mejor comportamiento, ya que, a cada 10 minutos, por ejemplo, se presentaba una correlación negativa de la variable y una disminución en el porcentaje de precisión del modelo.
- La combinación de magnitudes que mejor precisión le asignaron al modelo son: isócronas de tiempo de viaje del centro a la periferia a cada 5 minutos, precio del suelo a cada \$200.00 MXN, pendiente del suelo a cada 2° y densidad de población a cada 500 hab./km².

8. CONCLUSIONES

El presente estudio ha demostrado la viabilidad de usar variables relacionadas con la expansión urbana para reforzar un modelo que permite pronosticar la tendencia de crecimiento urbano con más del 80%, por lo tanto, con precisión.

La validación del modelo muestra un 91.42% de aceptación, por lo cual la hipótesis se cumple.

Respecto a la red vial, es más significativo el tiempo (0.13) de recorrido del centro a la periferia que la distancia (-0.21), por lo cual en el modelo no se incluyó este factor.

El método consistió en buscar los datos necesarios para formar la base, analizar y depurarlos en ArcMap y modelar en QGIS, con éste método se pudo cumplir el objetivo de la investigación, el cual es reforzar un modelo que permite pronosticar el crecimiento de una zona metropolitana mediante el uso de variables que estén íntimamente ligadas con la expansión urbana.

El uso del suelo se clasificó en siete clases. Los *rasters* de uso del suelo de 2003 y 2010 se utilizaron para proyectar los cambios probables en 2017, 2024, 2031 y 2038.

Los resultados de la clasificación indican un crecimiento significativo de algunos usos del suelo, principalmente campos agrícolas (1.82%) y área urbana (1.72%) durante el período de estudio, con una disminución en otros tipos de cobertura de la tierra, especialmente en áreas naturales (-3.51%). Debido a los cambios políticos que llevaron a un mayor crecimiento urbano en la Zona Metropolitana de Querétaro.

El pronóstico de crecimiento del área urbana desde 2017 es un promedio anual de 1.33%, lo cual indica un acelerado crecimiento al comparar este dato con lo que se presenta en las ciudades más grandes del país.

Las áreas donde la ciudad tiende a crecer son principalmente: al Oeste en el área plana del municipio de Corregidora y el área de Cerrito Colorado en el municipio de Querétaro, al Norte entre Jurica y Juriquilla en el municipio de Querétaro, al Este en la zona Milenio-Mirador y Pradera-refugio en el municipio de El Marqués, al Sur en el área de Candiles y libramiento Sur-Poniente, también en el Sur hubo un crecimiento histórico hasta la cima con las áreas naturales protegidas de El Cimatario y El Tángano. Las comunidades vecinas que forman parte del área metropolitana permanecen con pocos cambios ya que históricamente no han crecido mucho, excepto el pueblo de Santa Rosa Jáuregui.

El resultado de la proyección del cambio en el uso del suelo, sugiere que el área urbana continuará aumentando (1.33% anual) en el Área Metropolitana de Querétaro, y esto tendrá un efecto en los otros tipos de cobertura de la tierra, como la agricultura y las áreas naturales. El crecimiento de la población aumentará debido al incremento de áreas residenciales, centros comerciales y áreas industriales, acentuando la dispersión de la ciudad debido a que las personas prefieren vivir cerca de su lugar de trabajo.

La inclusión de variables socioeconómicas, como lo son precio de suelo y densidad poblacional, refuerza un modelo de pronóstico de crecimiento urbano ya que no siempre son las características geográficas e infraestructurales, como lo son la pendiente del suelo y la red vial, las que limitan o propician el fenómeno.

La información de costo de suelo y tiempos de traslado fue difícil de obtener debido a la naturaleza de dichos parámetros.

Se requiere trabajo adicional para obtener un modelo de trabajo con mayor precisión espacial, ya que el prototipo actual se usó para probar la viabilidad de usar variables de escala macro para modelar el crecimiento urbano. Las investigaciones futuras pueden centrarse en el uso de micro variables, como el uso de terrenos dentro de la ciudad.

De igual manera, otra posible línea de investigación es desarrollar y validar un índice de accesibilidad y/o conectividad que considere y determine la importancia de las vialidades en función de los puntos generadores y atractores de viajes, para considerarlo en la simulación del crecimiento urbano.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

9. REFERENCIAS

- Achibet M., Balev S., Dutot A. y Olivier D. (2014). A model of road network and buildings extension co-evolution. *Procedia computer science*. 32, 828-833.
- Adolphson M. (2009). Estimating a polycentric urban structure case study: Urban changes in the Stockholm region 1991-2004. *Journal of Urban Planning Development*. 1(19), 19-30.
- Aguayo M. I., Wiegand T., Azócar G. D., Wiegand K. y Vega C. E. (2007). Revealing the driving forces of mid-cities urban growth patterns using spatial modeling: a case study of Los Ángeles, Chile. *Ecology and Society*. 12(1), 13-42.
- Ahmed S. y Bramley G. (2015). How will Dhaka grow spatially in future? -Modelling its urban growth with a near-future planning scenario perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 4, 359-377.
- Ai-Ageili M., Mouhoub M., y Piwowar J. (2013). Integrating remote sensing, GIS and dynamic models: Cellular automata approach for the simulation of urban growth for the city of Montreal. *Electrical Computer Engineering*. 1-6.
- Al-Rubkhi A. N. M. (2017). Land Use Change Analysis and Modeling Using Open Source (QGIS). Case Study: Boasher Willayat. *Sultan Qaboos University, College of Arts and Social Science, Department Of Geography*. 1-30.
- Allen J. y Lu K. (2003). Modeling and Prediction of Future Urban Growth in the Charleston Region of South Carolina: a GIS-based Integrated Approach. *Conservation ecology*. 8(2), 16-35.
- Aljoufie M., Zuidgeest M., Brussel M. & Maarseveen M. V. (2013). Spatial-temporal analysis of urban growth and transportation in Jeddah City, Saudi Arabia. *Cities*. 31, 57-68.

- Alkaissi Z. A. y Hameed A. H. (2016). Cellular automata- dynamic model for urban growth Baqubah City. *Diyala Journal of Engineering Sciences*. 9(3), 12-23.
- Almeida C. M., Batty M., Monteiro A. M., Camara G. and Soares-Filho B.S. (2003). Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*. 27(5), 481-509.
- Amato F., Maimone B., Martellozzo F., Nolè G. y Murgante B. (2016). The effects of urban policies on the development of urban areas. *Sustainability*. 8 (4), 1-22.
- Amekudzi A., Thomas-Mobley L. y Ross C. (2007). Transportation planning and infrastructure delivery in major cities and megacities. *Transportation Research Record*. 1997, 17–23.
- Anas A., Arnott R. y Small K. A. (1998). Urban spatial structure. *Journal of Economic Literature*. 36 (3), 1426-1464.
- Angel Sh., Sheppard S. C., Civco D. L., Buckley P., Chabaeva A., Gitlin L., Kraley A., Parent J. y Perlin M. (2005). *The Dynamics of Global Urban Expansion*. Washington D. C., Estados Unidos: The World Bank.
- Angel S., Parent J., Civco D. L., Blei A. y Potere D. (2011). The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries 2000–2050. *Progress in Planning*. 75 (2), 53-107.
- Azócar G., Sanhueza R., y Henríquez C. (2003). Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: el caso de Chillán en Chile Central. *EURE- Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales*. 29(87), 79-82.
- Badwi I., El-Barmelgy M. y El-Din A. (2015). Modeling and Simulation of Greater Cairo Region Urban Dynamics Using SLEUTH. *Journal of urban planning and development*. 141(4), 1-19.

- Barthélemy M. y Flammini A. (2009). Co-evolution of density and topology in a simple model of city formation. *Networks and Spatial Economics*. 9, 401–425.
- Batty M., Longley P.A., (1994). *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*. Londres, UK: Academic Press.
- Bazant J. (2010). Expansión urbana incontrolada y paradigmas de la planeación urbana. *Espacio Abierto*. 3, 475-503.
- Bellet Sanfeliu C. y Llop Torné J. M. (2004). Miradas a otros espacios urbanos: las ciudades intermedias. *Geo Crítica / Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. 8 (165), s.p.
- Berling-Wolff S. y Wu J. (2004). Modeling urban landscape dynamics: a review. *Ecological Research*. 19 (1), 119–129.
- Bhatta B. (2010). Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data. Heidelberg, Alemania: Springer.
- Bonham-Carter G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Kidlington, U.K.: Pergamon.
- Burrough P. (1994). *Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment*. United Kingdom: Oxford Science.
- Campbell J. y Shin M. (2012). *Geographic Information System Basics*. Estados Unidos de América: Creative Commons.
- Cecchini A. y Rizzi P. (2001). *The reasons why cellular automata are a useful tool in the working-kit for the new millennium urban planner in governing the territory*. Honolulu, Estados Unidos: CUPUM 2001 Proceedings.

- Cifuentes P. A. (2009). Modelización de los factores de crecimiento urbano como aporte a la sostenibilidad. Estudio de caso: Manizales - Colombia. *Revista Internacional Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*. 4, 81-96.
- Chernykh D. V., Biryukov R. Y., Zolotov D. V. (2018). Spatiotemporal Dynamics of Landscapes of Plain and Mountain Catchments in the Altai Region During the Last 40 Years. *Geography and Natural Resources*. 39(3), 104-115.
- Chin N. (2002). *Unearthing the roots of urban sprawl: A critical analysis of form, function and methodology*. Londres, Inglaterra: Centre for Advanced Spatial Analysis, University College of London.
- Clarke K. C., Hoppen S. y Gaydos L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 24(2), 247-261.
- Cohen B. (2004). Urban growth in developing countries: A review of current trends and a caution regarding existing forecasts. *World Development*. 32(1), 23-51.
- Dadashpoor H. y Nateghi M. (2017). Simulating spatial pattern of urban growth using GIS-based SLEUTH model: A case study of eastern corridor of Tehran metropolitan region, Iran. *Environment, Development and Sustainability*. 19(2), 527-547.
- Dahal K. R. y T. E. Chow. (2014). An agent-integrated irregular automata model of urban land-use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*. 28(11), 2281-2303.
- Davoudi S. (2003). Polycentricity in European spatial planning: from an analytical tool to a normative agenda. *European Planning Studies*. 11(8), 979-999.
- Deep S. y Saklani A. (2014). Urban sprawl modeling using cellular automata. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 17, 179-187.

- Del Bosque I., Fernández C., Martín-Forero L., y Pérez E. (2012). *Los Sistemas de Información Geográfica y la Investigación en Ciencias Humanas y Sociales*. Madrid, España: Confederación Española de Centros de Estudios Locales (CSIC).
- Deng J. S., Wang K., Hong Y. y Qi J. G. (2009). Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landscape and Urban Planning*. 92, 187-198.
- Durán H., Medellín J. y Bernal E. (2007). La Vialidad en el Área Periférica. Elemento detonante de la dispersión urbana. *Investigación y ciencia - Universidad Autónoma de Aguascalientes*. 15 (38), 25-32.
- El Garouani A., Mulla D: J., El Garouani S. y Knight J. (2017). Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data: Case of Fez, Morocco. *International Journal of Sustainable Built Environment*. En prensa, 1-12.
- ESRI. (2010). *Learning ArcGIS Desktop for ArcGIS 10.0*. Curso virtual en la plataforma ESRI Training.
- European Spatial Planning Observation Network (ESPON). (2005). ESPON 111: Potentials for polycentric development in Europe. *Planning, Practice & Research*. 20(2), 235- 239.
- Ewing R., Hamidi Sh., James B. G., y Wei Y. D. (2016). Does urban sprawl hold down upward mobility?. *Landscape and urban planning*. 148, 80–88.
- Frankhauser P., Tannier C., Vuidel G. y Houot H. (2017). An integrated multifractal modelling to urban and regional planning. *Computers, Environment and Urban Systems*. 64, 132-146.
- Göbel Ch. (2015). Una visión alemana de los modelos de ciudad. El caso de Querétaro. *Revista Gremium*. 2 (4), 1-14.

- Gonzales P., Gómez M. y Benavente F. (2015). Simulación del crecimiento urbano y modelos basados en autómatas celulares: el uso de parcelas catastrales vectoriales a partir de la teoría de grafos. *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. En prensa, 511-520.
- Guan Ch. y Rowe P. (2017). In pursuit of a well-balanced network of cities and towns: A case study of the Changjiang Delta Region in China. *Urban analytics and city science*. En prensa, 1-19.
- Han Y. y Jia H. (2017). Simulating the spatial dynamics of urban growth with an integrated modeling approach: A case study of Foshan, China. *Ecological modelling*. 353, 107- 116.
- Harris C. y Ullman E. (1945). The nature of the cities. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*. 242(1), 7–17.
- Henríquez C. (2014). *Modelando el crecimiento de ciudades medias. Hacia un desarrollo urbano sustentable*. Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Howard E. (1898). *To-morrow: A peaceful path to real reform*. Londres, Inglaterra: Swan Sonnenschein & Co.
- Huisman O. y de By R. A. (2009). *Principles of geographic information systems: an introductory textbook*. Enschede, Países Bajos: ITC Educational Textbook Series.
- Husein A., Saleh B. y Al-Sheriadeh M. (2000). Mapping of landslide hazard zones in Jordan using remote sensing and GIS. *Journal Urban Planning development*. 1(1), 1–17.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Consejo Nacional de Población y Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (2015). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. Ciudad de México.

- Jafari M., Majedi H., Monavari S., Alesheikh A. y Zarkesh M. (2016). Dynamic simulation of urban expansion through a CA-Markov model case study: Hyrcanian region, Gilan, Iran. *European Journal of Remote Sensing*. 49(1), 513-529.
- Jat M. K., Choudhary M. y Saxena A. (2017). Application of geo-spatial techniques and cellular automata for modelling urban growth of a heterogeneous urban fringe. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 20, 223-241.
- Ji W., Wang Y., Zhuang D. F., Song D. P., Shen X., Wang W. y Li G. (2014). Spatial and temporal distribution of expressway and its relationships to land cover and population: A case study of Beijing, China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 32, 86-96.
- Jürgen E. (2014). *Announcing the release of QGIS 2.2*. OsGeo Software Projects <<http://osgeo-org.1560.x6.nabble.com/Announcing-the-release-of-QGIS-2-2-td5105239.html>>
- Kanchanamala S. (2014). Simulation of land use changes for the planning of a metropolitan area. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 181. 385-393.
- Kanemoto Y. y Kurima R. (2006). "Urban employment areas: Defining Japanese metropolitan areas and constructing the statistical database for them" en Okabe A. (eds), *GIS-based Studies in the Humanities and Social Sciences* (1ra edición). Boca Raton: CRC Press, 85-97.
- Kim D. (2009). Development of an optimization technique for a potential surface of spatial urban growth using deterministic modeling methodology. *Journal of Urban Planning and Development*. 135(2). 74-85.

- Laboratorio Unidad Pacífico Sur del Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (2010). *Sistemas de Información Geográfica*. Disponible en: <https://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/> (visitado el 13 de Abril de 2018).
- Lämmer S., Gehlsen B. y Helbing D. (2006). Scaling laws in the spatial structure of urban road networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 363, 89-95.
- Leao S., Bishop I. y 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(3), 145-158.
- Lee D. (1994). Retrospective on large-scale models. *Journal of the American Planning Association*. 60(1), 35-44.
- Ley general de asentamientos humanos, ordenamiento territorial y desarrollo urbano*. (2016). Diario Oficial de la Federación.
- Li L., Sato Y. y Zhu H. (2003). Simulating spatial urban expansion based on a physical process. *Landscape Urban Planning*. 64, 67-76.
- Li X. y Yeh A. (2000). Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*. 14(2), 131-152.
- Li X., Shi X., He J. y Liu X. (2011). Coupling Simulation and Optimization to Solve Planning Problems in a Fast-Developing Area. *Annals of the Association of American Geographers*. 101(5), 1032-1048.
- Li X., Gong P., Yu L. y Hu T. (2017). A segment derived patch-based logistic cellular automata for urban growth modeling with heuristic rules. *Computers, Environment and Urban Systems*. 65, 140-149.

- Liang X., Liu X., Li D., Zhao H. y Chen G. (2018). Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model. *International Journal of Geographical Information Science*. 1–23.
- Liu Y., He Q., Tan R., Liu Ya. y Yin Ch. (2015). Modeling different urban growth patterns based on the evolution of urban form: A case study from Huangpi, Central China. *Applied geography*. 66, 109-118.
- Liu Y., Hu Y., Long S., Liu L. y Liu X. (2017). Analysis of the effectiveness of urban land-use-change models based on the measurement of spatio-temporal, dynamic urban growth: A cellular automata case study. *Sustainability*. 9(5), 1–15.
- Longley P. A., Goodchild M., Maguire D. J. y Rhind D. W. (2010). *Geographic Information Systems and Science*, Tercera edición. E.U.A.: John Wiley & Sons.
- López L. (2015). *Diccionario de Geografía aplicada y profesional. Terminología de análisis, planificación y gestión del territorio*. España: Universidad de León.
- Lu C., Wu Y., Shen G. Q. y Wang H. (2013). Driving force of urban growth and regional planning: a case study of China's Guangdong Province. *Habitat International*, 40, 35–41.
- Luo J. y Wei Y. (2009). Modeling spatial variations of urban growth patterns in Chinese cities: The case of Nanjing. *Landscape and urban Planning*. 91, 51-64.
- Lynch K. (1960). *The image of the city*. Cambridge, E.U.A.: The technology press & Harvard University press.
- Lyu X., Han Q. y Vries B. (2017). Procedural modeling of urban layout: population, land use, and road network. *Transportation Research Procedia*. 25, 3337-3346.

- Ma Sh., Li X. y Cai Y. (2017). Delimiting the urban growth boundaries with a modified ant colony optimization model. *Computers, Environment and Urban Systems*. 62,146-155.
- Maparu T. S. y Mazumder T. N. (2017). Transport infrastructure, economic development and urbanization in India (1990–2011): Is there any causal relationship. *Transportation research part A: Policy and Practice*. 100, 319-336.
- McGarigal K. and Marks B. J. (1995). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. *General Technical Report PNW-GTR-351, USDA Forest Service*. Pacific Northwest Research Station: Portland.
- Midgley J. (1999). *Social development: The developmental perspective in social welfare*. Londres, Inglaterra: Sage Publications.
- Mitsova D., Shuster W. y Wang X. (2011). A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation. *Landscape and Urban Planning*. 99(2), 141-153.
- Nugroho F. y Al-Sanjary O. I. (2018). A review of simulation urban growth model. *International Journal of Engineering & Technology*. 7, 17-23.
- Office Management and Budget (OMB). (2010). Standards for delineating metropolitan and micropolitan statistical areas, part IV, No. 123. *Federal Register*. Estados Unidos de América.
- Olaya V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. España: sin editorial.
- Organización de las Naciones Unidas (2014). *Más de la mitad de la población vive en áreas urbanas y seguirá creciendo*. Nueva York, EUA: Centro de noticias ONU.

- Pérez-Molina E., Sliuzas R., Flacke J. y Jerren V. (2017). Developing a cellular automata model of urban growth to inform spatial policy for flood mitigation: A case study in Kampala, Uganda. *Computers, Environment and Urban Systems*. 65, 53-65.
- Portugali J. y Benenson I. (1995). Artificial planning experience by means of a heuristic cell-space model: simulating international migration in the urban process. *Environment and Planning A: Economy and Space*. 27, 1647–1665.
- Puderer H. (2008). Defining and Measuring Metropolitan Areas: A Comparison Between Canada and the United States. *Statistics Canada*. 1-29.
- Rahman M. T., Tabassum F., Rasheduzzaman M., Saba H., Sarkar L., Ferdous J., Uddin S. e Islam A. (2017). Temporal dynamics of land use/land cover change and its prediction using CA-ANN model for southwestern coastal Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*. 189, 1-18.
- Rechtman R. (1991). Una introducción a autómatas celulares. *Ciencias*. 24(1), 23-29.
- Roca J. (2010). “El fenómeno urbano en los siglos XX y XXI. Nuevas tendencias del desarrollo urbano”. *International Conference Virtual City and Territory. 6to. Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual*. Mexicali, México.
- Rodríguez J. (2007). *Urbanización y desarrollo en América Latina y el Caribe: Revisando la experiencia. EL Reporte Mundial de FNUAP*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Rodríguez J. y Olivella R. (2010). *Introducción a los Sistemas de Información Geográfica, conceptos y operaciones fundamentales*. Barcelona, España: Universitat Oberta de Catalunya.

- Rosen K. T. y Resnick M. (1980). The size distribution of cities: An examination of the Pareto law and primacy. *Journal of Urban Economy*. 8(2), 165–186.
- Rouleau B. (1967). *Le tracé des rues de Paris: formation, typologie, fonctions*. París, Francia: Éditions du Centre national de la recherche scientifique.
- Santé I., García A., Miranda D. y 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.
- Satterthwaite D. (2007). *The transition to a predominantly urban world and its underpinnings*. Londres, Inglaterra: International Institute for Environment and Development.
- Saunders S. C., Mislivets M. R., Chen J. Q. y Cleland D. T. (2002). Effects of roads on landscape structure within nested ecological units of the Northern Great Lakes Region, USA. *Biological Conservation*. 103, 209-225.
- Seto K., Fragkias M., Güneralp B. y Reilly M. K. (2011). A meta-analysis of global urban land expansion. *PLoS ONE*. 6(8).
- Shafizadeh-Moghadam H., Asghari A., Taleai M., Helbich M. y Tayyebi A. (2017). Sensitivity analysis and accuracy assessment of the land transformation model using cellular automata. *GIScience Remote Sensing*. 54(5), 639–656.
- Shi G., Shan J., Ding L., Ye P., Li Y. y Jiang N. (2019). Urban road network expansion and its driving variables: A case study of Nanjing City. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 1-16.
- Shimou Y. (1992). *The urban agglomeration in China*. Hefei, China: University of Science & Technology China Press.
- Simandan D. (2018). Competition, contingency, and destabilization in urban assemblages and actor-networks. *Urban Geography*. 39 (5), 655-666.

- Simmonds D., Waddell P. y Wegener M. (2011). Equilibrium v. dynamics in urban modelling. *Applied Urban Modelling*. 1-20.
- Snow D. (2003). *Plant engineer's reference book*. U.K.: Butterworth-Heinemann.
- Song J., Ye J., Zhu E., Deng J. y Wang K. (2016). Analyzing the impact of highways associated with farmland loss under rapid urbanization. *International Journal of Geo- information*. 5 (6), 1-17.
- Sterman J. (2000). *Business Dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world*. E.U.A.: McGraw-Hill.
- Sun Ch., Wu Z., Lv Z., Yao N. y Wei J. (2013). Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 21, 409–417.
- Smith J. W., Smart L. S., Dorning M. A., Dupéy L. N., Méley A. y Meentemeyer R. K. (2017). Bayesian methods to estimate urban growth potential. *Landscape and Urban Planning*. 163, 1-16.
- Taylor N. (1998). *Urban Planning Theory Since 1945*. Los Angeles: Sage Publications.
- Terrazas O. (2005). *La ciudad de los caminos*. Ciudad de México: Editorial CONACyT- UAM-A.
- Tian L., Li Y., Yan Y., y Wang B. (2017). Measuring urban sprawl and exploring the role planning plays: A Shanghai case study. *Land Use Policy*. 67, 426–435.
- Tong L., Hu Sh., Frazier A. E., y Liu Y. (2017). Multi-order urban development model and sprawl patterns: An analysis in China, 2000–2010. *Landscape and Urban Planning*. 167, 386–398.

- Torrens P. y Benenson I. (2005). Geographic automata systems. *International Journal of Geographical Information Science*. 19(4), 385–412.
- United Nations Human Settlements Programme. (2008). *State of the world's cities 2008/2009, harmonious cities*. Estados Unidos de América: Earthscan.
- UNFPA. (2007). *State of world population 2007: Unleashing the potential of urban growth*. Nueva York.
- Van Asselen S. y Verburg P. H. (2013). Land cover change or land-use intensification: simulating land system change with a global-scale land change model. *Global Change Biology*. 19 (12), 3648–3667.
- Van Vliet J. A., Bregt K. y Hagen-Zanker A. (2011). Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecological Modelling*. 222, 1367–1375.
- Veerbeek W., Pathirana A., Ashley R. y Zevenbergen Ch. (2015). Enhancing the calibration of an urban growth model using a memetic algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems*. 50, 53-65.
- Villar U. (2017). *Proyectan llegada de 15 mil personas en 2018 a Corregidora*. Cuadratín Querétaro.
- Von J. (1966). *Theory of self-reproducing automata*. Illinois, E.U.A: Urbana, University of Illinois Press.
- White R. y Engelen G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*. 25(8), 1175-1199.
- Worboys M. y Duckham M. (2004) *GIS: a computing perspective*. Estados Unidos de América: CRC Press.

- Wu F. (2002). Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science*. 16(8), 795-818.
- Wu J., Li R., Ding R., Li T. y Sun H. (2016). City expansion model based on population diffusion and road growth. *Applied mathematical modelling*. 43(1), 1-14.
- Yeh A. y Li, X. (2002). A cellular automata model to simulate development density for urban planning. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 29, 431–450.
- Ying L., Qizhi M. y Anrong D. (2009). Beijing Urban Development Model: Urban Growth Analysis and Simulation. *Tsinghua Science & Technology*. 14(6), 782-794.
- Zeng Ch., Liu Y., Stein A. y Jiao L. (2015). Characterization and spatial modeling of urban sprawl in the Wuhan Metropolitan Area, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 34, 10–24.
- Zhang Q., Wang J., Peng X., Gong P. y Shi P. (2002). Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multitemporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*. 23 (15), 3057-3078.
- Zheng Z. (2014). Spatial structure of the Changsha–Zhuzhou–Xiangtan urban agglomeration based on dynamic simulation analysis. *Journal of urban planning and development*. 141(4), 41-52.