

Análisis de la evolución espacio-temporal del uso de suelo urbano en la metrópolis de Chihuahua

Spatio-temporal evolution analysis of urban land use in the metropolis of Chihuahua

ANTONIO DÁVILA RODRÍGUEZ*
LUIS CARLOS ALATORRE CEJUDO*
LUIS CARLOS BRAVO-PEÑA*

Abstract

This research aims to monitor the change in spatial distribution patterns of urban land use that has occurred in the inter-municipal pressure zone of Chihuahua in the period 1995 to 2015. FRAGSTATS software was used to calculate the analysis metrics of the landscape ecology. Results indicate that the growth of the land destined for housing occurring in the study period is in line with the dispersed city model, characterized by low building density and the preponderance of private road transport.

Keywords: *urban sprawl, metropolitan area, FRAGSTATS*

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo la monitorización del cambio en los patrones de distribución espacial del uso del suelo urbano que se ha presentado en la zona de presión intermunicipal de Chihuahua en el periodo 1995-2015. Se utilizó el *software* FRAGSTATS para el cálculo de las métricas de análisis de la ecología del paisaje. Los resultados indican que el crecimiento del suelo destinado a vivienda que se presentó en el periodo de estudio se encuentra en consonancia con el modelo de ciudad dispersa, caracterizado por la baja densidad edificatoria y la preponderancia del transporte privado por carretera.

Palabras clave: expansión urbana, zona metropolitana, FRAGSTATS.

Introducción

El modelo de crecimiento urbano de las ciudades ha propiciado que los planificadores del espacio urbano implementen mejores formas de manejo de paisajes a una variedad de escalas a través del espacio y del tiempo. En el proceso de crecimiento y expansión de las ciudades se adhieren y absorben tierras con aptitud diferente a la urbana, que pueden representar un beneficio medioambiental y en su proceso generan un modelo de crecimiento desordenado (Dávila Rodríguez *et al.*, 2017). Este modelo urbano se caracteriza por su dispersión y fragmentación; sigue un patrón de baja densidad que demanda a diario largos y costosos viajes, poco accesibles y de baja calidad (Cortés Lara, 2016; Ustaoglu and Williams, 2017).

El factor urbano es uno de los principales elementos de deterioro ambiental en cuanto que concentra excesivos volúmenes poblacionales, ocupa grandes extensiones de suelo, demanda fuertes dotaciones de energéticos, genera cantidades impresionantes de desperdicios y residuos y agota exponencialmente los recursos naturales básicos de sus áreas periféricas (Cortés Lara, 2016; Esquivel Ceballos *et al.*, 2019).

La ciudad de Chihuahua, al igual que otras ciudades en México y Latinoamérica, expresa en su configuración espacial una forma de crecimiento caótico, donde el suelo no urbano colindante se va integrando a la mancha urbana sin orden ni concierto, a menudo con la creación de nuevas zonas urbanas en forma de parches aislados, alejados entre sí (Heinrichs *et al.*, 2009). En esta configuración espacial, conocida como salto de rana (Heim, 2001), desempeña un papel central la ausencia o debilidad de instrumentos jurídicos que orienten espacialmente la ampliación de la ciudad bajo un patrón más compacto (Bazant, 2001), que consolide con infraestructura y equipamiento las áreas ya ocupadas, en lugar de permitir la ampliación de la mancha urbana hacia nuevas zonas. También se identificaron problemas de crecimiento desordenado sobre terrenos topográficamente inadecuados, que dan origen a asentamientos irregulares donde la dotación de infraestructura resulta altamente costosa; asimismo se detectaron áreas subutilizadas, de tal modo que, como consecuencia del crecimiento desordenado, la ciudad se encuentra desarticulada vialmente, con incompatibilidad de usos, mala distribución de equipamiento, destrucción de elementos con valor histórico y artístico, en déficit de vivienda y en deterioro constante del medio natural por las acciones del hombre (Implan, 2015).

La monitorización y seguimiento de los cambios en los patrones de ocupación urbana que tienen lugar en las áreas metropolitanas se han realizado a través de la exploración de las características espaciales. Esto es posible mediante la aplicación de métricas o índices de análisis

espacio-temporales del paisaje. En este sentido, la ecología del paisaje se ha utilizado para los estudios urbanos y semiurbanos (Aguilera-Benavente, 2008). Los índices del paisaje que presenta el *software* FRAGS-TATS (McGarigal and Marks, 1995) complementan las estadísticas de ocupación de los usos del suelo, que tradicionalmente se aplicaba como único instrumento de valoración (Herzog and Lausch, 2001). La fragmentación, forma, aislamiento, conectividad, compacidad y elongación son indicadores que se utilizan para medir las características espaciales útiles en identificar y definir las propiedades espaciales de varios tipos de paisajes (Mateucci y Silva, 2005; Cocero Matesanz *et al.*, 2010; Cheng *et al.*, 2017), especialmente los urbanos (Herold *et al.*, 2005). Este tipo de métricas aportan nuevas posibilidades de análisis de los patrones de ocupación (Alberti, 1999), las formas de ocupación urbana (Herold *et al.*, 2003), escenarios futuros (Franco *et al.*, 2005) y modelos de simulación (Berling-Wolff and Wu, 2004). Son varios los trabajos que utilizan los índices de análisis espacial como un instrumento útil en la planificación y el seguimiento de los procesos de cambio del paisaje en las metrópolis desde el punto de vista urbano (Franco *et al.*, 2005; Caneparo, 2007; Prato, 2007; Geoghegan *et al.*, 1997; Alberti and Marzluff, 2004; Mateucci y Silva, 2005).

Con base en lo anterior, el objetivo principal de esta investigación es describir la evolución espacio-temporal del uso de suelo urbano en la zona metropolitana de Chihuahua en el periodo 1995-2015 tomando como base las tres localidades urbanas que conforman la zona de presión intermunicipal, desde la perspectiva del desarrollo urbano sustentable; en proceso de investigación se usaron imágenes de satélite Landsat-TM5 y *software* libre, como una alternativa en la adquisición de datos de bajo costo; asimismo se emplearon métodos basados en técnicas de teledetección.

Por lo tanto, se pretende dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿cuál es el patrón espacio-temporal del crecimiento urbano en la zona de presión intermunicipal de Chihuahua?, así como a las preguntas específicas: ¿cuál es el potencial de cambio y cuál es el potencial de transición en la cobertura y uso de suelo que sufrió la zona de presión intermunicipal de Chihuahua durante el periodo de 1995-2015?

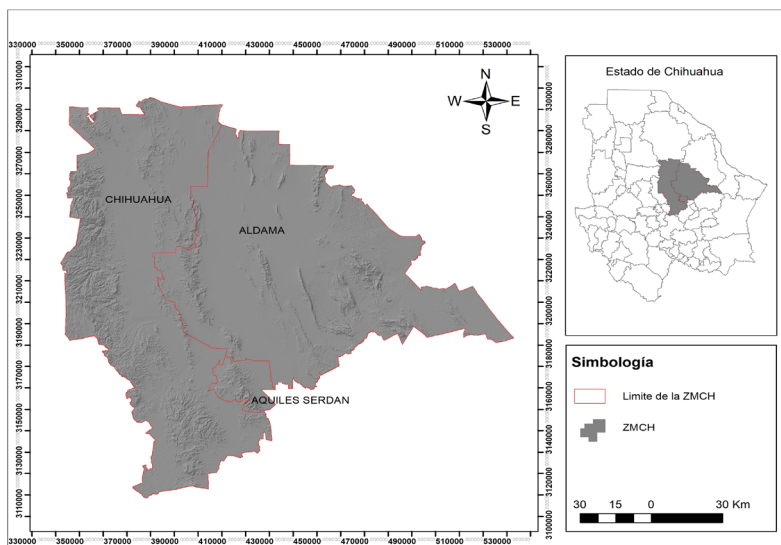
1. Materiales y Métodos

1.1. Descripción del área de estudio

El estado de Chihuahua con su capital homónima cuenta con 67 alcaldías, tiene una extensión de 247,460 km², la cual representa 12.6% del territorio nacional. Su población en 2015 fue de 3,556,574 habitantes, lo que

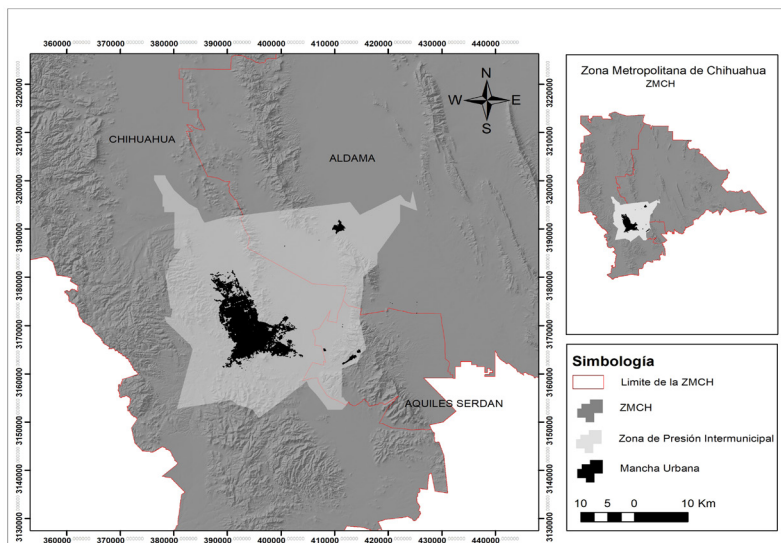
representa 3.0% del total del país, 85% de su población es urbana y 15% rural. La zona metropolitana de Chihuahua (ZMCH) (mapa 1) se conforma de tres municipios: Aldama, Aquiles Serdán y Chihuahua (Conapo, 2015); entre los tres suman 918,339 habitantes, que representan 25.82% con respecto al estado. La determinación del área de estudio (mapa 2) se realizó con base en la zona de presión intermunicipal conformada por las áreas susceptibles a desarrollar urbanísticamente ubicada entre los tres municipios conurbados, la cual se encuentra actualmente inmersa en una fuerte presión inmobiliaria considerando el desarrollo limítrofe de fraccionamientos en los límites municipales (Implan, 2015). Además, 97.94% de los habitantes de la ZMCH vive en las tres localidades clasificadas como urbanas, de las 1268 que la integran (Inegi, 2020).

Mapa 1
Zona metropolitana de Chihuahua



Fuente: elaboración propia con base en “Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015”. Mapa elaborado en ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

Mapa 2 Área de estudio



Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos del Instituto Municipal de Planeación de Chihuahua. Mapa elaborado en ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

1.2. Fuentes de datos

Se utilizaron tres escenas de satélite del sensor Landsat TM 1995, 2005 y 2015. El Path/Row correspondiente a la localización de la imagen con relación al índice Landsat fue el 32-40. Los datos y análisis de la información fueron soportados y procesados en el *software* RStudio (2009) Versión 1.1.463, ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016) y FRAGSTATS Versión 4.2 (McGarigal and Marks, 1995). Para el análisis de cambio de cobertura y uso de suelo se tomaron como base las imágenes de 1995 y de 2015.

1.3. Procesamiento de las imágenes de satélite

Todas las imágenes fueron preprocesadas por el U.S Geological Survey (USGS, 2019) usando métodos estándar de procesamiento, que incluyen corrección geométrica, calibración radiométrica y corrección por terreno; también fue necesario hacer una conversión de nivel digital (ND) a valores de reflectancia con la intención de comparar los cambios (Chuvieco, 2000).

1.4. Sobreposición de bandas

Como procedimiento base, las bandas de Landsat TM fueron sobrepuestas entre sí para lograr una conjunción en una sola imagen, procedimiento que se aplicó utilizando código de RStudio. Este procedimiento generalmente se lleva a cabo en el *software* IDRISI; sin embargo, como una novedad y algo poco usado se utilizó el *software* RStudio (2009), como una alternativa de *software* libre y de bajo costo. En el análisis geoespacial fue empleado Arcmap de ArcGis 10.5 (ESRI, 2016). Las imágenes satelitales fueron tratadas con métodos estándar de acuerdo con los requerimientos que sugiere Chuvieco (2000) para el análisis de cambio de cobertura y uso del suelo. Por último, se calculó la tasa de cambios de la zona de presión intermunicipal de Chihuahua utilizando la fórmula de interés compuesto (Puyravaud, 2003) para el periodo de 1995-2015.

1.5. Selección de índices de paisaje

Una vez obtenida la clasificación supervisada de las imágenes Landsat TM para cada una de las fechas involucradas en el periodo de estudio es importante convertir el archivo a formato TIF para que pueda ser procesado por el *software* FRAGSTATS (McGarigal and Marks, 1995). Para poder aplicar los índices de paisaje es necesario llevar a cabo un proceso de selección de los mismos, puesto que el número existente de ellos es muy amplio (Botequilha Leitao and Ahern, 2002). Se seleccionaron aquellos que cumplen con las características espaciales en lo que respecta a fragmentación, forma y dispersión (Botequilha Leitao *et al.*, 2006).

El conjunto de índices seleccionados es el siguiente: Número de Manchas (NP): Esta métrica nos aporta información de la medida en que un uso se encuentra dividido o fragmentado. Densidad de Manchas (PD): Equivale al número de manchas de ese uso dividido por al área total de la zona de estudio.

Tamaño Medio de las Manchas (AREA_MN): nos aporta una medida de la superficie media de las manchas individuales de un uso determinado. Compacidad Media de los Fragmentos (GYRATE_MN): esta métrica aporta una idea de la compacidad de los diferentes fragmentos, o en sentido inverso, de su elongación.

Índice de Forma (SHAPE): nos aporta una medida de la complejidad de la forma de las manchas de un determinado uso, a través de la relación entre el perímetro y la superficie. Distancia Media a las Manchas más Próximas (ENN_MN): aporta información acerca del grado de aislamiento de las manchas de un determinado uso.

2. Resultados

2.1. Composición de bandas

Para lograr los valores resultado de cada índice, ha sido necesaria la obtención de las imágenes de los usos del suelo urbano en la zona de presión intermunicipal de Chihuahua. Para ello fue necesario el análisis de imágenes de satélite multiespectrales con el objetivo de generar mapas base de cobertura y uso de suelo. El análisis preliminar de estos insumos permite obtener una representación real de las condiciones actuales y pasadas de las coberturas del uso del suelo y vegetación.

Las imágenes de falso color o RGB (Red, Green, Blue) consiste en la combinación de tres bandas de información para formar una imagen en color. Con este tipo de combinaciones se pretende extraer y resaltar la información en función de los colores resultantes.

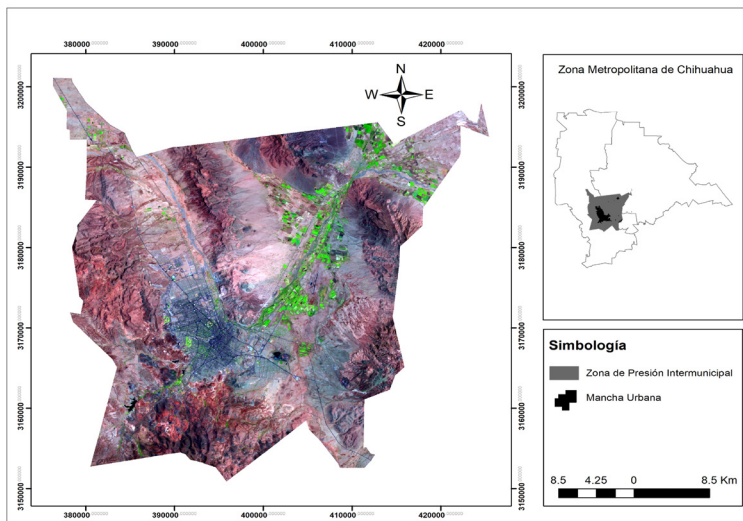
En este trabajo de investigación el empleo de imágenes Landsat TM5 proporcionó los elementos necesarios para obtener mapas base, conformados de las siguientes combinaciones de las bandas 3 (0.63-0.69 μm), 4 (0.76-0.90 μm) y 7 (2.08-2.35 μm) en el orden del espectro visible rojo, verde y azul (RGB), fueron las seleccionadas y las que mostraron un buen nivel de detalle en la discriminación de las coberturas vegetales para los periodos evaluados de 1995, 2005 y 2015.

Dichos mapas muestran las características de las condiciones de uso de suelo y vegetación en 1995 (mapa 3) y las mismas condiciones, con ligeros cambios espaciales, para las imágenes de 2005 (mapa 4) y de 2015 (mapa 5).

Las composiciones en falso color manifiestan buen contraste en las tres fechas evaluadas, evidenciando que la banda que corresponde al infrarrojo cercano (banda 4) es clave en el análisis de imágenes de satélite, cuyo objetivo principal sea determinar cambios entre las coberturas que componen el territorio.

Mapa 3

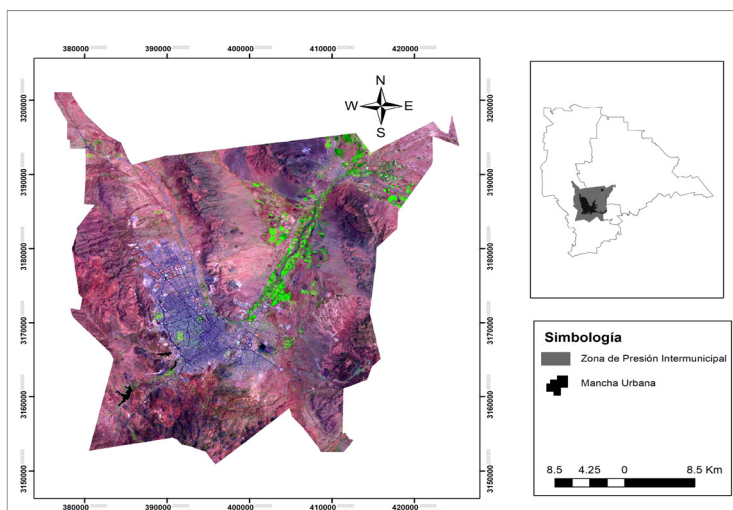
Composición en falso color de la escena Landsat TM del año 1995



Fuente: elaboración propia con base en la imagen Landsat LT05_L1TP_032040_19950529_20170107_01_T1 TM obtenida en U.S. Geological Survey. Mapa elaborado en RStudio (2009) Versión 1.1.463 y ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

Mapa 4

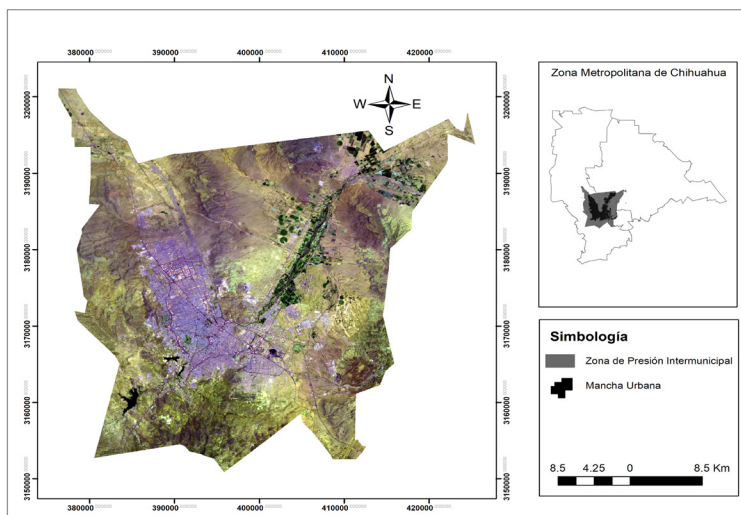
Composición en falso color de la escena Landsat TM del año 2005



Fuente: elaboración propia con base en la imagen Landsat LT05_L1TP_032040_20050508_20161126_01_T1 TM obtenida en U.S. Geological Survey. Mapa elaborado en RStudio (2009) Versión 1.1.463 y ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

Mapa 5

Composición en falso color de la escena Landsat TM del año 2015



Fuente: elaboración propia con base en la imagen Landsat LC08_L1TP_032040_20150520_20170301_01_T1 TM obtenida en U.S. Geological Survey. Mapa elaborado en RStudio (2009) Versión 1.1.463 y ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

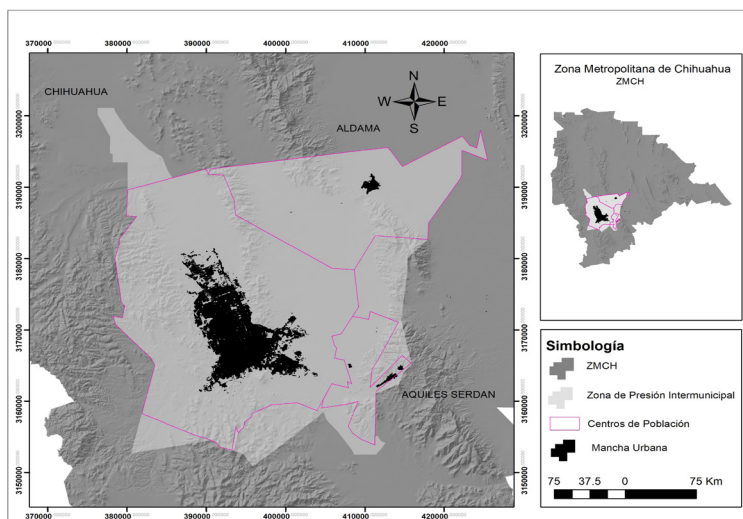
2.2. Clasificación multiespectral

En los mapas 3 y 5 se observa la distribución de la vegetación presente en la clasificación para 1995 y 2015, respectivamente, que se encuentra definida por el límite de presión intermunicipal de Chihuahua, es decir, más de la suma de los tres centros de población de las tres localidades urbanas que conforman la zona metropolitana de Chihuahua (mapa 6).

En la determinación de las superficies de 1995 (tabla 1), las comunidades más ampliamente distribuidas eran las de matorral, con 66,244.40 hectáreas (ha) (45.74%), seguidas de las comunidades de pastizal con 47,692.53 ha (32.92%) y la agricultura de riego y temporal con 19,454.22 ha que aproximadamente equivale a 13.43% del área de estudio. Los asentamientos humanos o áreas urbanas ocupaban 9263.61 ha y estaban representados principalmente por la ciudad de Chihuahua como el principal polo de desarrollo de la zona metropolitana. En los resultados de las superficies de la vegetación presente en 2015 (tabla 1), se observa claramente que siguen el mismo comportamiento respecto al porcentaje en su distribución; sin embargo, se observa una disminución considerable en la categoría de Agricultura de riego y temporal y un aumento en la categoría de Asentamientos humanos.

Mapa 6

Zona de presión intermunicipal de la ZMCH y Centros de Población



Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos del Instituto Municipal de Planeación de Chihuahua. Mapa elaborado en ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

Tabla 1
Superficies de la cobertura de uso de suelo y vegetación de la clasificación 1995 y 2015

	<i>Tipo de Cobertura</i>	<i>Superficie 1995 (ha)</i>	<i>%</i>	<i>Superficie 2015 (ha)</i>	
Ah	Asentamientos humanos	9263.61	6.39	19,457.73	13.43
Art	Agricultura de riego y temporal	19,454.22	13.43	8272.53	5.71
Cm	Comunidades de matorral	66,254.40	45.74	66,726.09	46.05
Cp	Comunidades de pastizal	47,692.53	32.92	47,580.21	32.84
Ca	Cuerpos de agua	84.87	0.06	345.24	0.24
Bep	Bosques de encino-pino	2108.43	1.46	2511.27	1.73
	TOTAL	144,858.06	100.00	144,893.07	100.00

Fuente: elaboración propia con base en resultados del cambio de cobertura y uso de suelo.

2.3. Análisis de cambios (Potencial de cambio y Potencial de Transición)

La comparación de imágenes clasificadas con respecto al periodo evaluado se presenta en la tabla 2, en la cual se detallan los cambios ocurridos en el lapso de 10 años. Los resultados del análisis se efectuaron tomando como base las clasificaciones independientes de cada fecha. El cambio más importante y evidente se presentó en la clase de asentamientos humanos con una tasa de cambio de 52.39%, lo que equivale a 10,194.12 hectáreas.

Tabla 2
Análisis de cambios de las coberturas y usos del suelo
presentes en el área de estudio

	<i>Tipo de cobertura</i>	<i>Superficie</i> <i>1995 (ha)</i>	<i>Superficie</i> <i>2015 (ha)</i>	<i>Diferencia</i> <i>(ha)</i>	<i>Tasa de</i> <i>cambio</i> <i>(%)</i>
Ah	Asentamientos humanos	9263.61	19,457.73	10,194.12	52.39
Art	Agricultura de riego y temporal	19,454.22	8272.53	-11,181.69	-57.48
Cm	Comunidades de matorral	66,254.40	66,726.09	471.69	0.71
Cp	Comunidades de pastizal	47,692.53	47,580.21	-112.32	-0.24
Ca	Cuerpos de agua	84.87	345.24	260.37	75.42
Bep	Bosques de encino-pino	2108.43	2511.27	402.84	16.04

Fuente: elaboración propia con base en resultados del cambio de cobertura y uso de suelo.

Los datos anteriores concuerdan con los registrados por el Inegi, el cual reporta una condición, en 1995, de 633,402 habitantes para la zona metropolitana de Chihuahua, aumentando su población, para 2015, a 918,339 (Inegi, 2020). En este sentido, el crecimiento de la población ha impactado fuertemente en el aumento de la mancha urbana, el cual ha promovido la construcción de fraccionamientos no planeados en tierras ejidales y de pastizales abiertos (Implan, 2015), y principalmente en tierras agrícolas que han perdido su vocación de uso de suelo agrícola para convertirse en áreas urbanas.

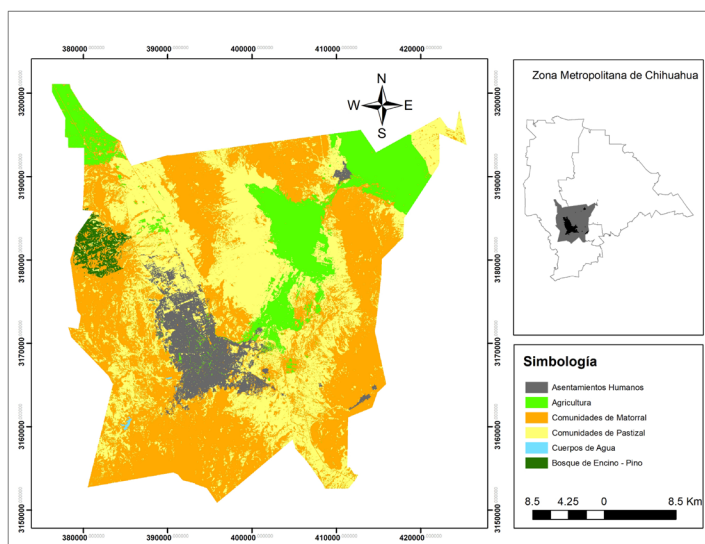
2.4. Separabilidad espectral

Se aplicó la técnica de clasificación supervisada basada en el método de máxima probabilidad para las imágenes del sensor Landsat TM de 1995, 2005 y 2015, se llevó a cabo a través de la asignación de seis clases, las cuales permitieron observar un punto medio entre la generalización y la dispersión de las clases, y de alguna forma establecer zonas homogéneas de algunas categorías de uso de suelo y vegetación. La selección de áreas de entrenamiento fue realizada considerando cada tipo de cobertura presente en el área de estudio.

Las clases identificadas fueron Agricultura de riego y temporal (Art), Asentamientos humanos (Ah), Bosques de encino-pino (Bep), Comunidades de matorral (Cm), Cuerpos de agua (Ca) y Comunidades de pastizal (Cp). El análisis de separabilidad espectral es un procedimiento importante en la determinación de la similitud que poseen las clases que se determinan en el proceso de clasificación.

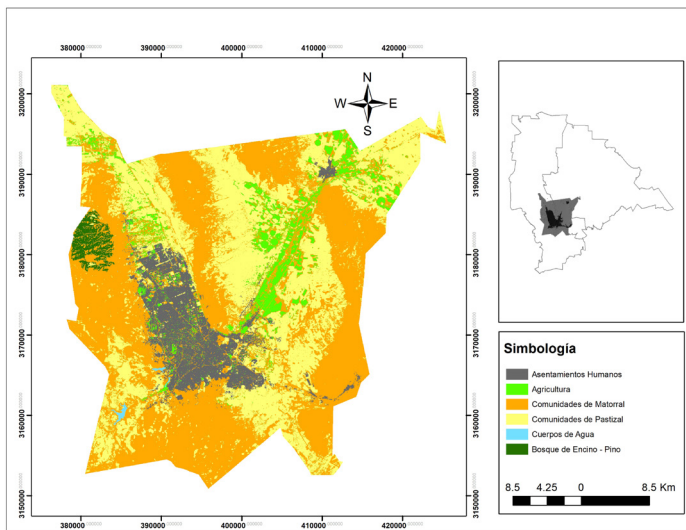
La evaluación mostró una adecuada separación espectral para todas las clases, lo que se traduce en una buena identificación de las coberturas en todas las bandas del sensor Landsat TM, que se utilizaron para generar la clasificación supervisada de los años 1995 (mapa 7), 2005 (mapa 8) y 2015 (mapa 9).

Mapa 7
Clasificación supervisada de la imagen Landsat TM del año 1995



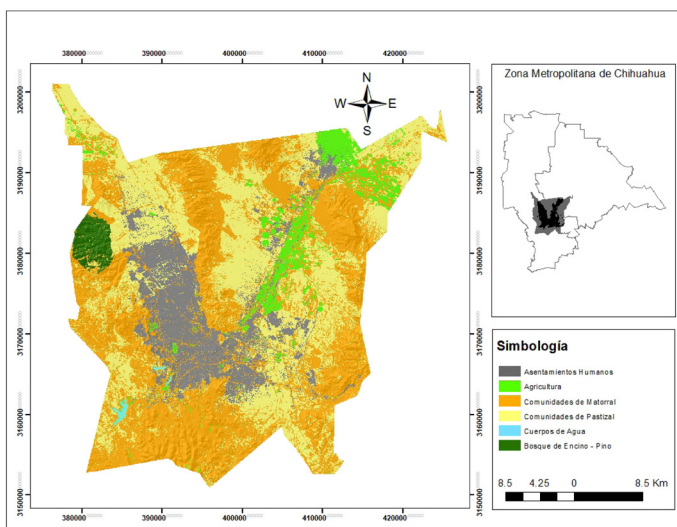
Fuente: elaboración propia con base en la manipulación de la composición en falso color de la escena Landsat TM de 1995. Mapa elaborado en ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

Mapa 8 Clasificación supervisada de la imagen Landsat TM del año 2005



Fuente: elaboración propia con base en la manipulación de la composición en falso color de la escena Landsat TM de 2005. Mapa elaborado en ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

Mapa 9 Clasificación supervisada de la imagen Landsat TM del año 2015



Fuente: elaboración propia con base en la manipulación de la composición en falso color de la escena Landsat TM de 2015. Mapa elaborado en ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

2.5. Matriz de error para la clasificación basada en Landsat-TM

En un estudio similar denominado “El proceso de expansión urbana y su impacto en la cobertura y uso de suelo de la zona de presión intermunicipal de Chihuahua” (Dávila Rodríguez *et al.*, 2017), la exactitud basada en el coeficiente multivariado discreto Kappa, para la clasificación de la imagen Landsat-TM5 de 2000 fue de 0.80, mientras que para 2010 fue de 0.81; este valor refleja el grado de exactitud esperada, más que la llevada a cabo por el simple azar. Sin embargo, en este estudio, además de tomar como referencia estos resultados que se realizaron a la misma área de estudio, se realizó una posclasificación que permitió, dado el conocimiento del área de estudio, una definición más exacta de las clases seleccionadas.

2.6. Determinación de la distribución espacial del uso de suelo urbano

El *software* FRAGSTATS (McGarigal and Marks, 1995) es un instrumento para el cálculo de las métricas de análisis de ecología del paisaje. Este *software*, de la Universidad Amherst de Massachusetts, de acceso libre disponible en la red (www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html), permite obtener un amplio conjunto de métricas de este tipo, está considerado como el programa más completo en lo que se refiere a la diversidad y capacidad para desarrollar cálculos métricos (Aguilera-Benavente, 2008).

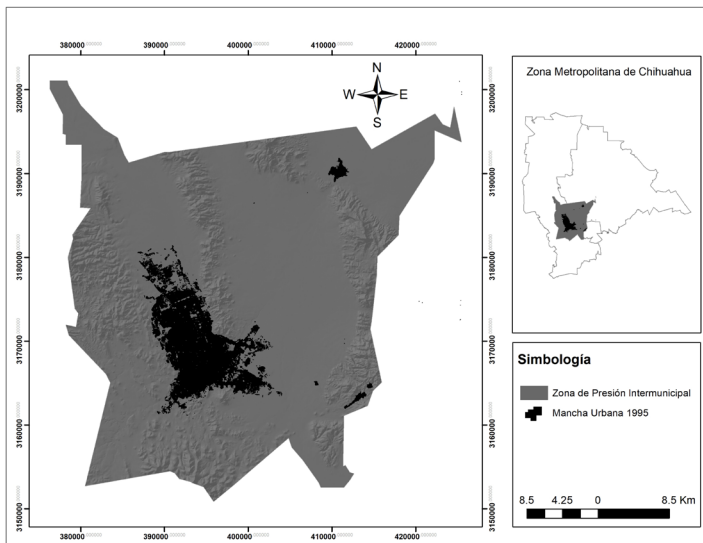
Es un *software* de análisis de patrones espaciales para cuantificar la estructura del paisaje que ha sido ampliamente empleado en estudios de paisajes agrarios, naturales e incluso urbanos y suburbanos. De esta forma se puede obtener un conjunto de índices de cuantificación de la estructura de los paisajes atendiendo a sus características espaciales, como instrumento de valoración de su cambio.

Gracias al empleo del *software* FRAGSTATS y a partir de los mapas de uso del suelo residencial en la zona de presión intermunicipal de Chihuahua para los años 1995 (mapa 10), 2005 (mapa 11) y 2015 (mapa 12), se han obtenido los valores de las distintas métricas seleccionadas para este estudio.

Estos valores nos permitirán medir la estructura del paisaje urbano en tres momentos diferentes y poder inferir los procesos de cambio que han tenido lugar en el periodo comprendido entre las tres fechas.

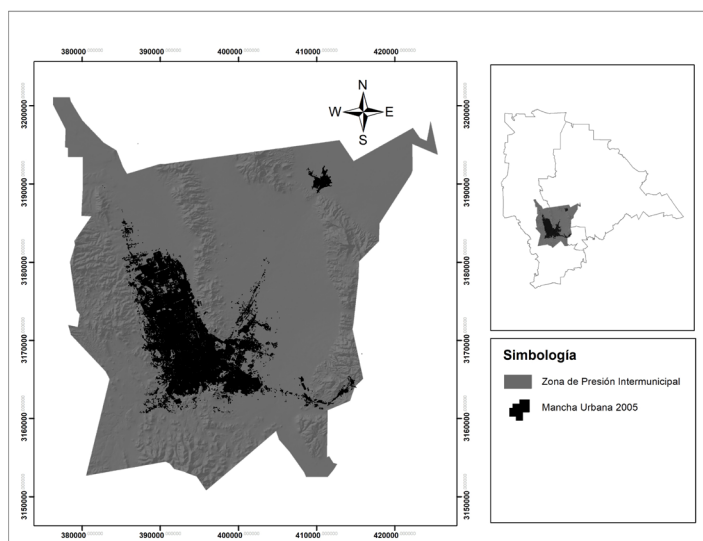
El análisis de los resultados obtenidos para cada una de las diferentes métricas en cada una de las tres fechas del estudio —1995, 2005 y 2015— nos arroja los siguientes datos (tabla 3): el número de manchas (NP) nos

Mapa 10 Distribución espacial del uso de suelo urbano de 1995



Fuente: elaboración propia con base en la manipulación de la clasificación supervisada de 1995 en FRAGSTATS (McGarigal and Marks, 1995). Mapa elaborado en ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

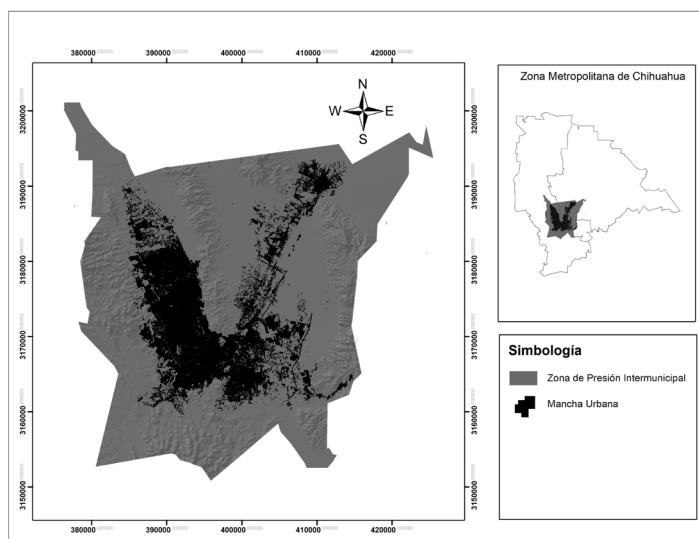
Mapa 11 Distribución espacial del uso de suelo urbano de 2005



Fuente: elaboración propia con base en la manipulación de la clasificación supervisada del año 2005 en fragstats (McGarigal and Marks, 1995). Mapa elaborado en ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

Mapa 12

Distribución espacial del uso de suelo urbano de 2015



Fuente: elaboración propia con base en la manipulación de la clasificación supervisada del año 2015 en fragstats (McGarigal and Marks, 1995). Mapa elaborado en ArcGIS® Versión 10.5 (ESRI, 2016).

Tabla 3
Determinación de la distribución espacial del uso de suelo urbano de la zona de presión intermunicipal de Chihuahua

AÑO	CLASE	NP	PD	AREA_MN	GYRATE_MN	SHAPE_MN	ENN_MN
1995	AH	737	0.5088	12.5693	37.7602	1.2664	105.4204
2005	AH	1586	1.0947	8.0594	34.3371	1.2636	100.0801
2015	AH	5197	3.5883	3.7438	30.4686	1.2327	87.9962

Fuente: elaboración propia con base en resultados de FRAGSTATS (McGarigal and Marks, 1995).

indica que el uso de suelo urbano en la zona de presión intermunicipal de Chihuahua se fragmenta en todo el periodo de estudio, al pasar de un total de 737 manchas en el primer año, a 1586 en el segundo periodo, y a 5197 para el 2015. Estos datos se corroboran con los resultados obtenidos mediante la densidad de manchas (PD), al aumentar de 0.5088 a 1.0957 y, finalmente, a 3.5883, respectivamente a los años señalados.

El tamaño medio de las manchas (AREA_MN) nos muestra que se produce un incremento de la fragmentación del uso de suelo urbano en el periodo de 1995-2015, al pasar de un valor de superficie media de las manchas de 12.5693 en 1995, a 8.0594 en 2005, y de 3.7438 para 2015.

Estos datos coinciden con los resultados conseguidos mediante la métrica compacidad media de los fragmentos (GYRATE_MN), ya que esta compacidad disminuye en todas las fechas señaladas del periodo de estudio al pasar de una compacidad media de 37.7602 para 1995 a 34.3371 para 2005 y finalizar con 30.4686 para 2015.

El índice de forma (SHAPE_MN) nos indica que la forma de las manchas del uso de suelo urbano prácticamente ha conservado su complejidad con el paso de los años, con valores de 1.2664, 1.2636 y 1.2327 para 1995, 2005 y 2015. Además, nos aporta una medida de la compacidad de los fragmentos; según los datos, éstos se han fragmentado más con el paso del tiempo. Por su parte, el índice distancia media a las manchas más próximas (ENN_NN) presenta unos valores de 105.4204 (1995), 100.0801 (2005) y 87.9962 (2015). La disminución del valor en todo el periodo de estudio nos hace suponer la aparición de nuevos fragmentos del uso del suelo urbano.

3. Discusión

En relación con el procesamiento de las imágenes para obtener los mapas base, en estudios relacionados se encontró que los datos empleados del sensor multispectral Landsat TM5 permiten determinar con buena precisión el uso de suelo y vegetación de determinada región (Pinedo Álvarez, 2008; Ashraf *et al.*, 2008; Dávila Rodríguez *et al.*, 2016). En otro estudio llevado a cabo en la región de Guadalupe y Calvo, Chihuahua, se resalta la importancia de la utilización de composiciones en falso color adecuadas y ajustadas para la región bajo estudio. En un estudio más, realizado para la parte norte y oeste de los Estados Unidos se determinó que las composiciones que mejor se ajustan para representar las coberturas fueron: banda 3 (0.5-0.6 μm), banda 4 (0.7-0.8 μm) y banda 5 (0.5-0.7 μm), información que coincide con los análisis obtenidos en este estudio para las bandas 3 y 5.

En la presente investigación, la técnica de clasificación supervisada permitió identificar seis clases de cobertura, situación similar se presentó en un estudio realizado en la reserva nacional de Valdivia (Segura y Trincado, 2003); en dicho estudio se pudieron identificar cinco clases de cobertura correspondientes a bosque adulto, renoval, plantaciones, matorral y comunidades de pastizal, la exactitud de la clasificación global fue de 64%, mientras que la clasificación de tipos de cobertura forestal fue de 77 por ciento.

Respecto a la aplicación de los índices seleccionados y procesados por el *software* FRAGSTATS (McGarigal and Marks, 1995), en este estudio

el *número de manchas* y la *densidad de manchas* nos indican que el suelo destinado a la vivienda se fragmentó durante el periodo de estudio. El *tamaño medio de las manchas* y la *compacidad media de los fragmentos* nos muestran que se produce un incremento de la fragmentación y una disminución en la compacidad de los fragmentos del uso de suelo urbano en el periodo de estudio. El *índice de forma y distancia media a las manchas más próximas* nos hace suponer la aparición de nuevos fragmentos del uso del suelo urbano y que éstos prácticamente han conservado su complejidad con el paso de los años. Además, de acuerdo con este comportamiento, el escenario que se visualiza a corto y mediano plazos para la zona de presión intermunicipal de Chihuahua es el tipo de crecimiento disperso y fragmentado.

Lo anterior nos permite deducir que el crecimiento de la mancha urbana de la zona de presión intermunicipal de Chihuahua fue de forma horizontal y dispersa. Esto coincide en parte con el estudio “Análisis de la evolución de la estructura espacial del uso del suelo residencial en el área metropolitana madrileña” (Cocero Matesanz *et al.*, 2010), el cual, tras aplicar esta serie de índices, encontró una forma de crecimiento disperso durante el primer periodo de estudio. Sin embargo, se reportó un proceso de compactación durante el segundo periodo. Los resultados de otro estudio llamado “Examining spatiotemporally varying effects of urban expansion and the underlying driving factors” (Cheng *et al.*, 2017) aplicado a la ciudad de Xuzhou en China, en donde solamente se escogieron tres métricas –Number of Patches (NP), Largest Patch Index (LPI) y Mean Shape Index (SHAPE MN)– nos indican que la ciudad sufrió un proceso de urbanización rápido y acelerado durante el periodo de estudio, lo que detonó que la ciudad creciera bajo modelo de crecimiento difuso o disperso.

Los resultados anteriores van en contra de la sustentabilidad urbana, ya que existe una estrecha relación entre la sustentabilidad y las formas que adquiere el paisaje (Andersson, 2006). Mayor dispersión en la ciudad, con polígonos urbanos cada vez más pequeños, alejados entre sí, implica mayor costo en la dotación de servicios públicos; pues una ciudad dispersa demanda el recorrido de distancias mayores para el abastecimiento de agua potable, drenaje urbano, energía eléctrica, etc. Esto encarece los costos que paga el usuario (Lara Pulido *et al.*, 2017), y sin duda es una manifestación de las externalidades económicas de un mercado inmobiliario del suelo que pone el interés individual por encima del interés colectivo. También tiene un papel relevante el costo del suelo, pues se ha demostrado en distintas latitudes del mundo que el bajo costo de los terrenos agrícolas, generalmente más barato en las áreas colindantes a la zona urbana, favorece una dispersión espacial que disminuye a la larga la habitabilidad de los espacios urbanos recién creados (Peerzado *et al.*, 2019).

Los beneficiarios de las transacciones inmobiliarias (vendedores y fraccionadores) privatizan las ganancias de un mercado del suelo no regulado por instrumentos de planeación urbana, pero socializan los costos al resto de los habitantes de la ciudad, al disminuir la calidad de los servicios urbanos por la dificultad que representa proveerlos bajo esa configuración espacial. Del mismo modo, se incrementan los tiempos y costos de traslado entre zonas habitacionales y áreas de trabajo, aumentando la dependencia del vehículo individual como medio de transporte (Ustaoglu and Williams, 2017). A una mala calidad de servicios se suma una mala calidad del aire por la contaminación de vehículos automotores (Resnik, 2010).

En relación con lo anterior, existen estudios que abordan la problemática del crecimiento urbano desde diferentes ángulos y en un sinfín de variables, todos tienen la finalidad, en mayor o menor medida, de analizar el efecto negativo en el aspecto ambiental, social o económico. Sin embargo, este estudio únicamente tuvo la intención de describir la evolución de la forma urbana en las últimas décadas conociendo si ha sido un crecimiento ordenado y compacto o desordenado y fragmentado.

Frente a estos impactos de la dispersión urbana, las métricas del paisaje presentadas en este trabajo constituyen herramientas que permiten caracterizar patrones de crecimiento urbano no sustentables. Lo anterior puede contribuir a la planeación del espacio en la zona metropolitana de Chihuahua y tiene la posibilidad de incorporarse a los planes de ordenamiento territorial. Si conocemos el problema, que en este caso es cómo estamos creciendo, podemos después abordar las consecuencias de este modelo de crecimiento, sólo entonces podremos aportar soluciones a la problemática de estudio.

Conclusiones

Tomando en cuenta que los cambios más importantes se presentaron en la clase de asentamientos humanos, resulta evidente la relación que existe entre los procesos de crecimiento y expansión de la ciudad con el cambio de cobertura y uso de suelo. Por lo tanto, se concluye que el proceso de expansión urbana de la zona de presión intermunicipal de Chihuahua ha provocado cambios en la cobertura y uso de suelo, viéndose afectadas principalmente las tierras agrícolas.

Los resultados presentados también muestran la existencia de una serie de cambios en los patrones de distribución espacial del uso de suelo residencial en la aglomeración urbana de la zona metropolitana de Chihuahua, desde 1995 al 2015.

El crecimiento del suelo destinado a vivienda que ha tenido lugar en el periodo 1995-2015 se encuentra en consonancia con el modelo de ciudad dispersa, caracterizado por la baja densidad edificatoria, la discontinuidad y fragmentación de los nuevos usos del suelo en el territorio y la preponderancia del transporte privado por carretera.

Por lo tanto, el empleo de una serie de índices de análisis espacial, empleado generalmente en la ecología del paisaje, se ha demostrado útil para la determinación de las características espaciales de los cambios a cualquier escala, especialmente la escala metropolitana. Estas métricas posibilitan el análisis de formas y patrones de ocupación urbana, además de monitorizar el cambio en los usos urbanos a lo largo del tiempo, a través de su seguimiento temporal, lo que permite identificar procesos metropolitanos de cambio, detectando posibles tendencias o nuevas formas y modelos de ocupación.

Estudios como éste inciden favorablemente en los patrones y dinámica de cambio en el uso del suelo mediante la anticipación de las tendencias de cambio y elaboración de pronósticos que permitan determinar el menor impacto en los recursos naturales debido al crecimiento de la ciudad en el marco de la planeación urbana sustentable. Es indudable que la forma en la que se manifiesta la ciudad hoy en día reclama ser vista desde una forma integral y holística. De esta forma entenderemos que la ciudad se comporta de un modo distinto que la suma de las partes que la integran.

Lo anterior nos permite encontrar soluciones de forma integral entre las relaciones e interacciones de las partes y no solamente con un enfoque reduccionista. La planeación del espacio físico es una actividad impostergradable, la cual se debe apoyar en instrumentos como el ordenamiento del territorio y el enfoque de la sustentabilidad en la planeación urbana. La planeación urbana sustentable puede ser una posibilidad para satisfacer las necesidades de la población sin agotar el capital natural e incluyendo la minimización de costos ambientales hacia el futuro.

Fuentes consultadas

Aguilera-Benavente, Francisco (2008), "Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la aglomeración urbana de Granada", tesis de doctorado, Universidad de Granada, Granada.

Alberti, Marina (1999), "Urban Patterns and Environmental Performance: What Do We Know?", *Journal of Planning Education and*

Research, 19 (2), Washington, University of Washington, pp. 151-163.

Alberti, Marina and Marzluff, John (2004), "Ecological Resilience in Urban Ecosystems: Linking Urban Patterns to Human and Ecological Functions", *Urban Ecosystems*, 7 (3), Salzburg, Society for Urban Ecology, pp. 241-265.

Andersson, Erick (2006), "Urban Landscapes and Sustainable Cities", *Ecology and Society*, 11 (1) Stockholm, Stockholm University, <<https://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art34/>>, 15 de enero de 2019.

Ashraf, Yasin; Athar, Habib; Harris, Philip and Taekryoun, Kwon (2008), "Some Prospective Strategies for Improving Crop Salt Tolerance", *Advances in Agronomy*, vol. 97, Coventry, Coventry University, pp. 45-110.

Bazant, Jan (2001), "Lineamientos para el ordenamiento territorial de las periferias urbanas de la Ciudad de México", *Papeles de Población*, 7 (27), Toluca, Universidad Autónoma del Estado de México/ Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población, pp. 223-239.

Berling-Wolff, Sheryl and Wu, Jianguo (2004), "Modeling Urban Landscape Dynamics: A Case Study in Phoenix", *Urban Ecosystems*, vol. 7, Arizona, School of Life Sciences, pp. 215-240.

Botequilha Leitao, André and Ahern, Jack (2002), "Applying Landscape Ecological Concepts and Metrics in Sustainable Landscape Planning", *Landscape and Urban Planning*, 59 (2), Amherst, Universidad de Massachusetts, pp. 65-93.

Botequilha Leitao, André; Miller, Joseph; Ahern, Jack and McGarigal, Kevin (2006), *Measuring Landscapes: A Planner's Handbook*, Washington, Island Press.

Caneparo, Luca (2007), "Generative Platform for Urban and Regional Design", *Automation in Construction*, vol. 16, Torino, Politecnico di Torino, pp. 70-77.

Cheng, Li; Zhao, Jie and Xu, Yong (2017), "Examining Spatiotemporally Varying Effects of Urban Expansion and the Underlying

Driving Factors”, *Sustainable Cities and Society*, vol. 28, Stuttgart, E. Schweizerbart’s verlagsbuchhandlung, pp. 307-320.

Chuvieco, Emilio (2000), *Fundamentos de teledetección espacial*, Madrid, Rialp.

Cocero Matesanz, David; Azcárate Luxan, María Victoria; García Lázaro, Francisco Javier; Muguruza Cañas, Carmen y Santos Preciado, José Miguel (2010), “Análisis de la evolución de la estructura espacial del uso del suelo residencial en el área metropolitana madrileña”, en José Ojeda Zújar; Ismael Vallejo Villalta y María Fernanda Pita López (eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*, Sevilla, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, pp. 777-787.

Conapo (Consejo Nacional de Población) (2015), *Delimitación de zonas metropolitanas de México 2015*, Ciudad de México, Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, <<https://www.gob.mx/conapo/documentos/delimitacion-de-las-zonas-metropolitanas-de-mexico-2015>>, 13 de marzo de 2020.

Cortés Lara, Mara Alejandra (coord.) (2016), *Aportes a la sustentabilidad: Una mirada desde la gestión del territorio y los recursos naturales*, Tlaquepaque, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.

Dávila Rodríguez, Antonio; Corona Zambrano, Elva Alicia; Pinedo Álvarez, Alfredo; Jiménez Rentería, Gaspar; Pinedo Álvarez, Carmelo; Rojas Caldelas, Rosa Imelda y Ranfla González, Arturo (2016), “Marginación y cambio de cobertura y uso del suelo de la zona metropolitana de Chihuahua”, *Investigación y Ciencia*, 24 (67), Aguascalientes, Universidad Autónoma de Aguascalientes, pp. 38-45.

Dávila Rodríguez, Antonio; Pinedo Álvarez, Alfredo; Pinedo Álvarez, Carmelo y Prieto Amparán, Jesús (2017), “El proceso de expansión urbana y su impacto en la cobertura y uso de suelo de la zona de presión intermunicipal de Chihuahua”, *Ciencia*, núm. 86, Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo León, pp. 32-38.

Esquivel Ceballos, Víctor; Alatorre Cejudo, Luis Carlos; Robles Morua, Agustín y Bravo Peña, Luis Carlos (2019), “Crecimiento urbano de Ciudad Juárez Chihuahua (1920-2015): Hipótesis sobre el

impacto en las coberturas y uso de suelo y el abatimiento del acuífero urbano”, *Acta Universitaria*, vol. 29, Ciudad Juárez, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, pp. 1-29.

ESRI (2016), Arcgis, versión 10.5, Environmental Systems Research Institute, Redlands, California, ESRI.

Franco, Daniel; Bombonato, Anna; Mannino, Ilda and Ghetti, Pierfrancesco (2005), “The Evaluation of a Planning Tool Through the Landscape Ecology Concepts and Methods”, *Management of Environmental Quality An International Journal*, 16 (1), Venice, University of Venice, pp. 55-70.

Geoghegan, Jacqueline; Wainger, Lisa and Bockstael, Nancy (1997), “Spatial landscape indices in a hedonic framework: an ecological economics analysis using GIS”, *Ecological Economics*, 23 (3), Elsevier, pp. 251-264.

Heim, Carol (2001), “Leapfrogging, Urban Sprawl and Growth Management: Phoenix, 1950-2000”, *The American Journal of Economics and Sociology*, 60 (1), Amherst, University of Massachusetts, pp. 245-283.

Heinrichs, Dirk; Nuissl, Henning y Rodríguez Seeger, Claudia (2009), “Dispersión urbana y nuevos desafíos para la gobernanza (metropolitana) en América Latina: El caso de Santiago de Chile”, *EURE*, 35 (104), Santiago de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, pp. 29-46, doi: <https://doi.org/10.4067/S0250-71612009000100002>

Herold, Martin; Goldstein, Noah and Clarke, Keith (2003), “The Spatio-Temporal Form of Urban Growth: Measurement, Analysis and Modeling”, *Remote Sensing of Environment*, 86 (3), Ellison Hall, University of California Santa Barbara, pp. 268-302.

Herold, Martin; Couclelis, Helen and Clarke, Keith (2005), “The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change”, *Computer and Environment Urban*, 29 (4), Ellison Hall, University of California Santa Barbara, pp. 369-399.

Herzog, Felix and Lausch, Angela (2001), “Supplementing Land-Use Statistics with Landscape Metrics: Some Methodological Consi-

derations”, *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 72, Leipzig, Center for Environmental Research, pp. 37-50.

Implan (Instituto Municipal de Planeación) (2015), “Programa de Ordenamiento de la Zona Metropolitana de Chihuahua: Aldama-Chihuahua-Aquiles Serdán”, Chihuahua, Instituto Municipal de Planeación.

Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2020), “Número de habitantes”, Aguascalientes, Inegi, <<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chih/poblacion/default.aspx>>, 20 de marzo de 2020.

Lara Pulido, José Alberto; Estrada Díaz, Gabriela; Zentella Gómez, Juan Carlos y Guevara Sanginés, Alejandro (2017), “Los costos de la expansión urbana: Aproximación a partir de un modelo de precios hedónicos en la Zona Metropolitana del Valle de México”, *Estudios Demográficos y Urbanos*, 32 (1), Ciudad de México, Universidad Iberoamericana, pp. 37-63.

Mateucci, Silvia y Silva, Mariana (2005), “Selección de métricas de configuración espacial para la regionalización de un territorio antropizado”, *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, núm. 5, Madrid, Asociación Española de Geografía, pp. 180-202.

McGarigal, Kevin and Marks, Barbara (1995), “FRAGSTATS: a Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure”, *General Technical Report*, Corvallis, United States Department of Agriculture-Oregon State University, <www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>, 20 de marzo de 2020.

Peerzado, Moula; Magsi, Habibullah and Sheikh, Muhammad (2019), “Land use conflicts and urban sprawl: Conversion of agriculture lands into urbanization in Hyderabad, Pakistan”, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18 (4), Tandojam, Sindh Agriculture University, pp. 423-428.

Pinedo Álvarez, Alfredo (2008), “Modelación de atributos de bosques templados con Landsat TM y SPOT HRV e índice de sitio como indicador de productividad”, tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua.

- Prato, Tony (2007), “Evaluating Land Use Plans Under Uncertainty”, *Land Use Policy*, 24 (1), Columbia, Universidad de Missouri, pp. 165-174.
- Puyravaud, Jean Philippe (2003), “Standardizing the Calculation of the Annual Rate of Deforestation”, *Forest Ecology and Management*, vol. 177, Smithsonian Tropical Research Institute, Elsevier, pp. 593-596.
- Resnik, David (2010), “Urban Sprawl, Smart Growth, and Deliberative Democracy”, *American Journal of Public Health*, 100 (10), Washington, D. C., American Public Health Association, pp. 1852-1856, doi: doi.org/10.2105/AJPH.2009.182501
- RStudio (2009), “RStudio PBC”, [RStudio], versión 1.1.463, RStudio PBC, Boston, Estados Unidos.
- Segura, Reinaldo y Trincado, Guillermo (2003), “Evolución del paisaje y estado de conservación de la reserva forestal de Valdivia”, *Landscape ecology*, núm. 19, Berlín, Springer, pp. 197-209.
- USGS, (United States Geological Survey) (2019), Imágenes satelitales escala 1:1,513,051, Reston, Virginia, United States Geological Survey, <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>, 23 de enero de 2019.
- Ustaoglu, Eda and Williams, Brendan (2017), “Determinants of Urban Expansion and Agricultural Land Conversion in 25 EU Countries”, *Environmental Management*, 60 (4), Berlín, Springer, pp. 717-746.

Recibido: 26 de marzo de 2020.

Reenviado: 8 de noviembre de 2020.

Aceptado: 7 de septiembre de 2020.

Antonio Dávila Rodríguez. Doctor en Planeación y Desarrollo Sustentable por la Universidad Autónoma de Baja California. Actualmente está terminando su segundo año de estancia posdoctoral en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Su línea de investigación actual es planeación urbana sustentable. Entre sus más recientes publicaciones destacan, en coautoría: “El proceso de expansión urbana y su impacto en la cobertura y uso de suelo de la zona de presión intermunicipal de Chihuahua”, *Ciencia*, núm. 86, Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo León, pp. 32-38 (2017); “Grado de marginación de la zona metropolitana de Chihuahua:

un comparativo entre el año 2000 y el 2010”, *Tecnociencia Chihuahua*, 10 (1), Chihuahua, Universidad Autónoma de Chihuahua, pp. 39-48 (2016), y “Marginación y cambio de cobertura y uso del suelo de la zona metropolitana de Chihuahua”, *Investigación y Ciencia*, núm. 67, Aguascalientes, Universidad Autónoma de Aguascalientes, pp. 38-45 (2016).

Luis Carlos Alatorre Cejudo. Doctor en Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente por la Universidad de Zaragoza, España. Actualmente es profesor-investigador de tiempo completo en la División Multidisciplinaria de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, en Cuauhtémoc, Chihuahua, México. Es parte del núcleo académico básico de la licenciatura en geoinformática, también de la maestría en Planificación y Desarrollo Urbano, y del doctorado en Estudios Urbanos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel I. Su línea de investigación actual es análisis espacial de procesos geoambientales. Entre sus más recientes publicaciones destacan, en coautoría: “Agricultural Furrow Irrigation Inefficiency in the Basin of the Laguna de Bustillos, Chihuahua, Mexico: Geometric Characteristics of Agricultural Plots and Aquifer Depletion”, *Tecnologías y Ciencias del Agua*, 10 (5), Jiutepec, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, pp. 241-281 (2019); “Temporal Changes of NDVI for Qualitative Environmental Assessment of Mangroves: Shrimp Farming Impact on the Health Decline of the Arid Mangroves in the Gulf of California (1990-2010)”, *Journal of Arid Environments*, 125 (1), Ámsterdam, Elsevier, pp. 98-109 (2016), y “Regional Scale Modeling of Hillslope Sediment Delivery: a Case Study in Barasona Reservoir Watershed (SPAIN) using WATEM/SEDEM”, *Journal of Hydrology*, 391 (1), Ámsterdam, Elsevier, pp. 109-123 (2010).

Luis Carlos Bravo-Peña. Doctor en Ciencias opción Desarrollo Regional. En la actualidad es profesor-investigador de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez desde el 2010. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel I. Sus líneas de investigación son: políticas públicas y medio ambiente, impactos sobre el paisaje y vulnerabilidad socio-ambiental, modelos de aptitud territorial y ordenamiento ecológico, dinámica de uso y cobertura de suelo. Entre sus más recientes publicaciones destacan, como coautor: “Áreas quemadas y cambio de uso del suelo en el suroeste de Chihuahua (México) durante el periodo 2013-2017: Identificación con el índice Normalized Burn Ratio (NBR)”, *Acta Universitaria*, vol. 29, Guanajuato, Universidad de Guanajuato (2019) pp. 1-15; “Áreas probables de degradación-deforestación de la cubierta

vegetal en Chihuahua, México. Una exploración mediante regresión logística para el período 1985-2013”, *Geofocus*, núm. 20, Madrid, Asociación de Geógrafos Españoles, pp. 109-137 (2017), y como coordinador del libro *Geoinformática aplicada a la generación de cartografías temáticas: clima, recursos hídricos, vulnerabilidad social y deforestación*, Ciudad Juárez Chihuahua, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (2019).