

## 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

Urban growth of Ciudad Juárez Chihuahua (1920-2015): Hypothesis about impacts on the land use and land cover and depletion of the urban aquifer

Víctor Hugo Esquivel Ceballos<sup>1\*</sup>, Luis Carlos Alatorre Cejudo<sup>2</sup>, Agustín Robles Morua<sup>3</sup>, Luis Carlos Bravo Peña<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doctorado en Estudios Urbanos (DEU) / Instituto de Arquitectura Diseño y Arte, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ). Av. Plutarco Elías Calles #1210, Fovissste Chamizal, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, C.P. 32310.

\*Correo electrónico: victorhugoesquivelceballos@gmail.com

<sup>2</sup>División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ).

<sup>3</sup>Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora.

\*Autor de correspondencia

### Resumen

El acelerado crecimiento urbano a escala global y sus efectos negativos sobre el sistema hídrico subterráneo natural se atribuyen principalmente a la concentración de población que registran las áreas urbanas. En el presente trabajo se analizó el crecimiento urbano de Ciudad Juárez (1920-1940; 1940-1950; 1950-1960; 1960-1970; 1970-1980; 1980-1990; 1990-2000; 2000-2010 y 2010-2015), los cambios de cobertura y uso de suelo urbano y el abatimiento del acuífero urbano. Los resultados derivan de la correlación estadística y espacial entre covariables generadas: Tasas de Cambio de Crecimiento Urbano Histórico (TCCUH: %), Tasas de Cambio de Usos de Suelo Urbano (TCUSU: %), Crecimiento Poblacional (Población: %) y Tasa de Cambio en Abatimiento (TCA: m año<sup>-1</sup>). El crecimiento fue de 35 222 ha. El uso habitacional está estrechamente ligado al uso industrial y de servicios. El nivel estático del acuífero arrojó TCA media de -0.53 m año<sup>-1</sup>. Las covariables que mejor explicaron la TCA son TCCUH y la TCUSU. Del análisis del comportamiento del crecimiento urbano en función de los usos de suelo, se concluye que, de los usos, los habitacionales son los que mayor recurso de agua demandan.

**Palabras clave:** Crecimiento urbano; cambios de cobertura y uso de suelo urbano; abatimiento de acuífero; tasas de cambio; Ciudad Juárez Chihuahua.

### Abstract

The rapid urban growth on a global scale, and its negative effects on the natural underground water system, are attributed mainly to the concentration of population registered in urban areas. In this paper, the urban growth of Ciudad Juarez (1920-1940; 1940-1950; 1950-1960; 1960-1970; 1970-1980; 1980-1990; 1990-2000; 2000-2010 y 2010-2015), the changes in coverage and use of urban land, and the depletion of the urban aquifer were analyzed. The results are derived from the statistical and spatial correlation between the covariates generated: Rates of Change of Historical Urban Growth (TCCUH: %), Rates of Change of Urban Land Use (TCUSU: %), Population Growth (Population: %), and Rate of Change in Abatement (TCA: m year<sup>-1</sup>). The growth was 35 222 ha. The use of housing is closely linked with industrial use and services. The static level of the aquifer showed an average TCA of -0.53 m year<sup>-1</sup>. The covariates that best explained the TCA are TCCUH and TCUSU. From the analysis of the behavior of the urban growth in function of the land uses, it is concluded that, of the uses, housing is among those which demand a greater water resource.

**Keywords:** Urban growth; changes in the coverage and use of urban land; depletion of the aquifer; rates of changes; City Juarez Chihuahua.

Recibido: 23 de agosto de 2018

Aceptado: 15 de agosto de 2019

Publicado: 6 de noviembre de 2019

Como citar: Esquivel-Ceballos, V. H., Alatorre-Cejudo, L. C., Robles-Morua, A., & Bravo-Peña, L. C. (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* 29, e2369. doi. <http://doi.org/10.15174/au.2019.2369>

## Introducción

De acuerdo con las Naciones Unidas, en el mundo, se estima que la población se incrementará en 37% para el 2050, concentrándose el 94% en zonas urbanas (*United Nations*, 2008). Se estima que el mayor crecimiento se dará en ciudades de países en vías de desarrollo que actualmente cuenta con alrededor de 750 000 habitantes (*Food and Agriculture Organization [FAO]*, 2011; *McDonald et al.*, 2011a; *United Nations*, 2008).

En este sentido, el análisis del crecimiento urbano es realizado desde varias disciplinas. Por ejemplo, entre otras, la urbanística, interpreta los estadios urbanos, describe la evolución de la ciudad por periodos de expansión y estancamiento, a través de su forma urbana (Ros, Jiménez, & Silvente, 2016). Existen evidencias de cómo el crecimiento urbano ha modificado negativamente el medio natural, especialmente suelo y agua (Patra, Sahoo, Mishra, & Mahapatra, 2018), sobreexplotando los recursos naturales sin reconocer límites, perturbando los sistemas naturales locales y globales (Cifuentes & Llop, 2015).

El impacto ambiental, social y económico derivado del acelerado crecimiento urbano ha generado afectaciones en todo el mundo y, como tal, debe abordarse. En dicho contexto, el uso de modelos de ocupación del territorio y metabolismo urbano (Chen & Chen, 2015), de acuerdo con Newman (1999), en Cifuentes & Llop (2015), actualmente deben ser reanalizados, principalmente donde converge el crecimiento urbano, el incremento poblacional, los cambios de usos de suelo y el agotamiento de los recursos naturales, como el hídrico subterráneo (Howard & Gerber, 2018).

En dicho contexto, de acuerdo con Patra *et al.* (2018), los estudios se han focalizado en el análisis bivariado de los efectos urbanos sobre los cambios de usos y cobertura del suelo (USCS), así como los impactos sobre algunas variables ambientales como la temperatura, las precipitaciones y los niveles del agua subterránea. Sin embargo, han quedado al margen el análisis multivariado de los impactos del crecimiento urbano, existiendo actualmente un vacío en torno a estos análisis y los reportes de estudios del tema (Patra *et al.*, 2018). Patra *et al.* (2018) recomiendan un análisis multicriterio, donde además de considerar la edificación del área construida, se debe contemplar la distribución espacial y temporal de los usos de suelo urbano.

Ahora bien, de acuerdo con Al-Fugara, Al-Shabeeb, Al-Shawabkeh, Al-Amoush & Al-Adamat (2018), estos análisis se han enfocado principalmente en la planificación regional y local, buscando conocer y satisfacer las necesidades poblacionales ante el rápido crecimiento dinámico espacial de la expansión de suelo urbano, apoyándose en los sistemas de información geográfica (SIG), sensores remotos (SR) e imágenes de satélite (IS), comprobando que existe una correlación positiva entre el crecimiento poblacional y la urbanización (Al-Fugara *et al.*, 2018).

En general, el crecimiento de las ciudades demanda más suelo y agua, basando las soluciones en la flexibilidad y conocimiento de normas locales; por lo tanto, se carece de estudios espaciales empíricos multicriterio que permitan un mejor entendimiento de las afectaciones del crecimiento urbano e implementación de políticas de planeación y gestión urbana (Shrestha, Roth, & Joshi, 2018), que favorezcan el desarrollo de ciudades hídricamente sustentables (Cervera, 2007; Cifuentes & Llop, 2015).

Por ejemplo, las ciudades asentadas sobre la cuenca hidrológica binacional Canadá-EUA de los grandes lagos han disminuido la calidad y cantidad de agua subterránea disponible, incrementando la presión en términos de gestión y protección de los recursos hídricos urbanos (Howard & Gerber, 2018), además, existe una necesidad urgente de hacer un uso más eficiente de agua subterránea urbana. Para esto se requiere la aplicación de herramientas y metodologías alternas a las tradicionales, en la predicción de

cómo, dónde y durante qué periodo pueden agravarse o ser irreversibles las consecuencias sobre el acuífero subterráneo (Howard & Gerber, 2018).

En este sentido, McDonald *et al.* (2011a), a través del análisis geográfico global, identificó las tres principales estrategias implementadas en las ciudades para la provisión de agua urbana en localidades áridas y semiáridas donde, comúnmente frente a la escasez, se incrementa el suministro, recurriendo el 50% de las veces al recurso subterráneo, traslado de cuencas vecinas y desalinización, y en el 50% ocasionalmente se recurre a perforaciones privadas, cosecha de lluvia y venta privada del agua local.

En cuanto a la entrega de agua, asociado al rápido crecimiento y la pobreza, el 66% de las veces se recurre al recurso subterráneo, perforaciones privadas, cosecha de lluvias y venta privada del agua local, y el 34% rara vez se recurre a la desalinización y transporte desde grandes distancias. Por último, respecto a la afectación de la calidad hídrica a causa los usuarios localizados aguas arriba de las corrientes superficiales y subterráneas, el 17% de las veces se recurre comúnmente al recurso subterráneo y, finalmente, en el 83% ocasionalmente recurre a la perforación privada, trasvase, desalinización, cosecha de lluvias y venta privada del agua local (McDonald *et al.*, 2011a).

Las estrategias adoptadas para la provisión de agua son distintas; sin embargo, el recurso subterráneo es más recurrido y explotado por lo asequible, la falta de recursos financieros y modelos de predicción actualizados que permitan entender mejor la evolución del uso no sostenible del agua urbana (Johnson, 2001; McDonald *et al.*, 2011a). En este sentido, la cuantificación, clasificación y evolución del crecimiento de las ciudades y el cambio de usos de suelo urbano han sido limitadas o no se han correlacionado del todo con la sobreexplotación de recursos hídricos subterráneos (Patra *et al.*, 2018). Lo anterior complica el establecimiento de patrones espaciales y temporales, así lo sostiene Hasse & Lathrop (2003).

Ahora bien, estos cambios definidos como indicadores de: (1) eficiencia de la utilización de la tierra; (2) pérdida de tierras de cultivo; (3) pérdida de humedales naturales; (4) pérdida del hábitat central de bosques; e (5) incremento de la superficie impermeable (Hasse & Lathrop, 2003); han impulsado la transición de suelo natural a territorio urbano, afectando el ciclo hidrológico y las áreas de recarga, degradando la cantidad y calidad del agua que entra al acuífero a través de la infiltración, acelerando el abatimiento ante la creciente extracción (Aristegui & Pérez, 2014; Brockerhoff, 2000; Glaeser & Kahn, 2003; Jantz, Goetz & Shelley, 2004; Patra *et al.*, 2018).

El abatimiento, asociado a usos urbanos altamente demandantes de agua como el doméstico, industrial y energético (Herrera, Orozco & Mujica, 2011; Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO, por sus siglas en inglés], 2010), además del factor poblacional y su crecimiento, se ha asociado a la ausencia de políticas de planificación en función de la disponibilidad y acceso de los recursos naturales comunes como el hídrico Swyngedouw (1995), en Cifuentes & Llop (2015); UNESCO, 2010; Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas [WWAP, por sus siglas en inglés], 2016). Ahora bien, si la primera ley de la geografía dice que todo está relacionado con todo (Tobler, 1970), es indudable que se pueden establecer las relaciones espaciales y temporales entre covariables en las zonas periurbanas y urbanas a escala local, regional y global (Alatorre, Díaz, Miramontes, Bravo & Sánchez, 2014; Alig, Kline & Lichtenstein, 2004; Díaz, Bravo, Alatorre & Sánchez, 2014; Mendoza, 2006; Patra *et al.* 2018; Sánchez, Granados, Chávez, Martínez & Terrazas, 2011; Watson *et al.*, 2000).

México es un país de contrastes espaciales y geográficos en cuanto al crecimiento urbano, distribución poblacional y disponibilidad hídrica (Sisto, 2011); no es ajeno a los efectos de la transformación

de sus ciudades (Cervera & Rangel, 2015). El problema se agudiza sobre territorio árido y semiárido del país, que concentra el 77% de la población y el 31% del recurso hídrico renovable (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2005); además, reportes oficiales establecen para las próximas décadas escenarios de incremento en las temperaturas y disminución de la precipitación, agudizando la disponibilidad del agua (Comisión Nacional del Agua, 2011). A nivel nacional se cuenta con 653 acuíferos (Comisión Nacional del Agua, 2014), de los cuales, al 2010 a nivel nacional, el 62% del volumen concesionado extraído ha sido para uso urbano y doméstico (Comisión Nacional del Agua, 2011).

Estas diferencias y grado de presión geográficamente diferenciado sobre aguas superficiales y subterráneas exponen el problema de demanda, disponibilidad y abatimiento del recurso hídrico para consumo humano (Conagua, 2008). Los datos demuestran que 100 acuíferos estaban en categoría de sobreexplotación en el 2009 y que 72 se ubican en las entidades federativas de Sonora, Chihuahua, Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Durango, Nuevo León, Guanajuato, Puebla, San Luis Potosí, Zacatecas, Estado de México y Querétaro (Conagua, 2011).

El crecimiento urbano en la frontera norte de México ha mostrado un comportamiento acelerado en las últimas décadas, derivado de la instalación de la industria maquiladora como principal generador de empleos (Taylor, 2003). Ciudad Juárez Chihuahua creció 20% en el periodo de 2010 al 2015, por lo que el incremento de la población y de suelo urbano ha ocasionado un deterioro ambiental y abatimiento del acuífero (Aristegui & Pérez, 2014). En dicho contexto, la funcionalidad y versatilidad de sistemas compuestos georreferenciados han sido usados en la solución de problemas de planificación y gestión, convirtiéndose en una herramienta poderosa en el conocimiento exhaustivo de fenómenos urbanos (Alatorre *et al.*, 2014; Díaz *et al.*, 2014; García-Almirall, Valls & Moix, 2011), además de técnicas geoestadísticas que permiten la integración de las variables sociales, naturales y urbanas antes descritas (Dhar, Sahoo, Dey & Sahoo, 2014; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2013).

Determinar los efectos del crecimiento sobre el comportamiento de acuíferos es fundamental para evaluar la sustentabilidad de las ciudades. Por un lado, la presión genera tensión y competencia con los territorios vinculados a actividades no urbanas (Díaz *et al.*, 2014), mientras que, por otro lado, amenaza a la ciudad al disminuir el agua disponible para consumo directo e indirecto (Cervera, 2007).

Una reducción en la disponibilidad del agua se traduce en disminuciones de la calidad de vida, afectaciones a la competitividad económica de las ciudades y, en el peor de los casos, problemas de salud pública urbana (WWAP, 2016). También, constituye un escenario que ya se observa de forma regular en ciudades del norte árido de México, como Hermosillo o Chihuahua donde el abatimiento de acuíferos disminuye la calidad de vida de sus habitantes, encarece los costos por disponibilidad de este vital recurso y amenaza la persistencia de las ciudades en el largo plazo (Ojeda de la Cruz, Narvaez-Tijerina, & Quintana-Pacheco, 2014).

Por esto es importante medir el impacto del crecimiento urbano sobre la disponibilidad hídrica. Su monitorización constante, permite definir políticas de crecimiento urbano acordes a la realidad geográfica de las ciudades. Se trata de un tema crucial para la sustentabilidad urbana, que pocas veces se ha abordado de forma empírica en los trabajos de planeación hídrica urbana. Si bien en la literatura académica se reconoce su importancia, son pocas (McDonald, 2011a; Patra *et al.*, 2018; WWAP, 2016) las experiencias de evaluación sistemáticas que aborden este tema mediante metodologías científicas rigurosas. Y este fue el objetivo del trabajo que aquí se presenta.

En este trabajo se presenta un análisis geoespacial histórico del crecimiento urbano de Ciudad Juárez. Dicho crecimiento se correlacionó con los cambios en las coberturas de uso de suelo (urbano) y el

abatimiento en el acuífero local. Para ello, se han planteado los siguientes objetivos específicos: i) Caracterizar espacial y temporalmente el crecimiento urbano de Ciudad Juárez en los periodos de 1920-1940, 1940-1950, 1950-1960, 1960-1970, 1970-1980, 1980-1990, 1990-2000, 2000-2010 y 2010-2015; ii) analizar la evolución temporal y espacial de las coberturas y uso de suelo que se han desarrollado dentro del área urbana en los mismos periodos (1920-2015); iii) determinar la evolución temporal y espacial del abatimiento del acuífero local, así como las tasas de cambio anual de los niveles estáticos; y iv) determinar los impactos espaciales y temporales del crecimiento urbano sobre las covariables analizadas. Por lo tanto, en esta investigación se establece como hipótesis, primera vez para Ciudad Juárez, si el grado, magnitud y dirección de la relación espacial y temporal que existe entre el crecimiento urbano, sus consecuentes cambios en cobertura y uso de suelo corresponden a la dinámica que ha venido presentando el abatimiento en el acuífero urbano (píxeles).

## Área de Estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, dentro del gran desierto de Chihuahua en las coordenadas geográficas 31° 44' 22" latitud N, 106° 29' 13" longitud O, a una altura de 1137 msnm (figura 1). En esta ciudad, la temperatura promedio anual es de 18.4 °C, con una oscilación térmica de 13.8 °C a 21.8°C, representando la segunda ciudad más cálida del estado (figura 2). La precipitación promedio anual es de 260 mm, y la pluviometría es de 104 mm en el año más seco y 536.3 mm en el año más lluvioso, definiéndose como un clima muy seco templado (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015).

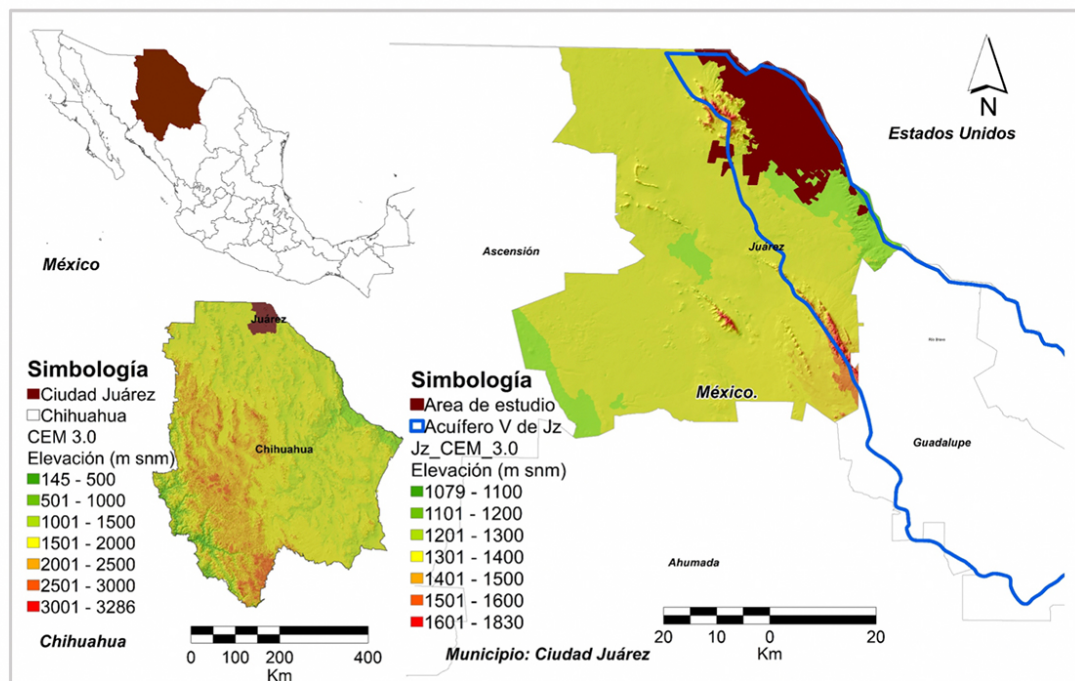
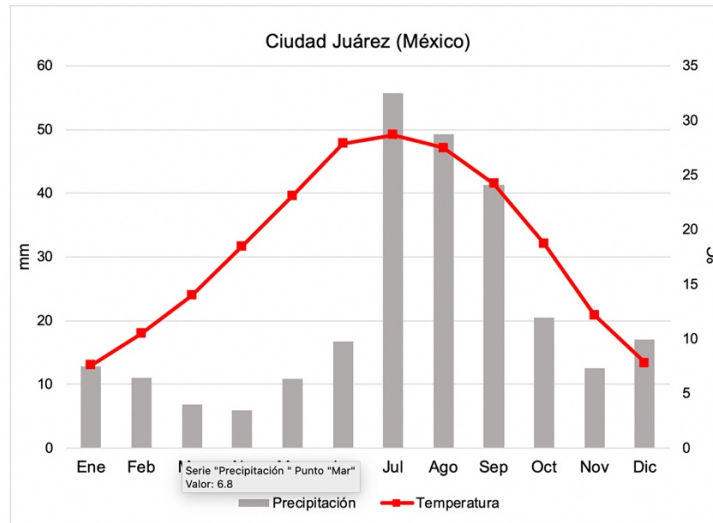
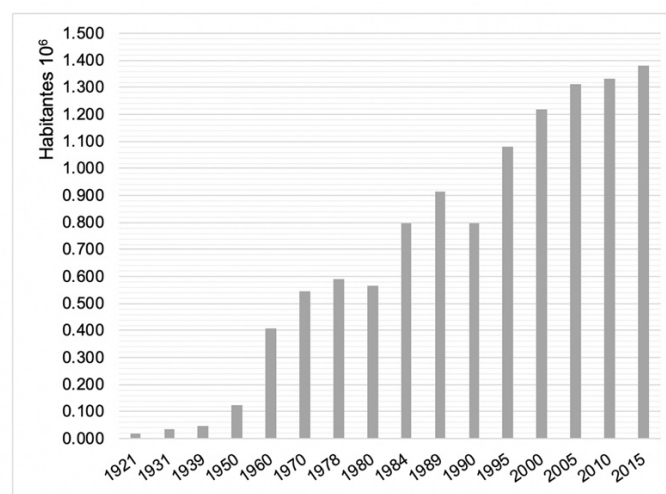


Figura 1. Localización del área de estudio, ubicada sobre el acuífero Valle de Juárez (0833).  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2.** Comportamiento de la precipitación total acumulada y la temperatura promedio mensual de Ciudad Juárez, donde se observa que en el mes de julio inicia el régimen pluviométrico estacional, concentrando el 56% de la precipitación total anual en los meses de julio agosto y septiembre; por último, la temperatura media de los meses más cálidos es de 28 °C (junio, julio y agosto).  
Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI. Anuario estadístico y geográfico de Chihuahua 2015.

Fisiográficamente, se encuentra dentro de las sierras y llanuras plegadas del norte. Carece de cuerpos de agua superficiales y está limitada al Norte por el Río Bravo, que ha mostrado un comportamiento intermitente en los últimos años, representando junto con la lluvia la única fuente de recarga a los acuíferos somero y profundo del Valle de Juárez, cuenta con un área de recarga de 3386 km<sup>2</sup> que forma parte del acuífero Bolsón del Hueco en la parte mexicana (Conagua, 2015). Cuenta con 218 pozos y cero tomas de agua en operación en fuente de abastecimiento tipo río, es una ciudad dependiente al 100% del recurso hídrico subterráneo (<http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=08#>). La población es 1 332 131 de acuerdo con el censo de población y vivienda 2010. Tiene una densidad poblacional de 392.2 habitantes por kilómetro cuadrado. Históricamente, ha sido considerada polo de atracción migratoria por su actividad económica e industrial, impulsando el crecimiento sociodemográfico (figura 3) y expansión urbana de la entidad (Taylor, 2003).



**Figura 3.** Comportamiento del crecimiento histórico poblacional de Ciudad Juárez, periodo (1921-2015).  
Fuente: Elaboración propia con datos de Oscar J. Martínez "Border Boom Town Ciudad Juárez since 1848", INEGI 1980, 1990, 2000 e INEGI 2005 en Márquez (2008) y Ayuntamiento de Juárez Instituto Municipal de Investigación y Planeación [IMIP] (2016)



## Materiales y Métodos

A continuación, se plantea y desarrolla el marco metodológico para el adecuado abordaje y solución del tema de investigación. Además, se detalla el origen de la información obtenida, las características de esta y las técnicas empleadas para su tratamiento y análisis.

### Análisis del crecimiento urbano (1920-2015)

El desarrollo metodológico se basa en la aplicación y enfoque geoestadístico a través de los SIG (Semarnat, 2013). Para el primer objetivo, se utilizó la base de datos del crecimiento urbano histórico de la ciudad del periodo 1920-2010, del Instituto de Investigación y Planeación (IMIP) de Ciudad Juárez (figura 4); se actualiza hasta el 2015 a través de técnicas de percepción remota (PR). Para el año 2015 (figura 7), se utilizaron imágenes satelitales de Landsat 8, estas fueron georreferenciadas y corregidas geoméricamente por medio de puntos de control, se usaron intersecciones o puntos conocidos de referencia; en este caso, el Aeropuerto Internacional de Ciudad Juárez, el cauce del Río Bravo y avenidas principales. En esta primera corrección, se aplicó el algoritmo desarrollado por (Palá & Pons, 1996). Después, se les realizó una corrección atmosférica por medio del módulo ATMOSC, en el *software* IDRISI Kilimanjaro. Se eligió el modelo Cos (t), modelo de sustracción de objetos oscuros (DOS). Para obtener el área urbana del año 2015, se aplicaron composiciones de falso color separando correctamente el área urbana de las coberturas de vegetación y suelo desnudo (Chuvieco, 1996, en Brizuela, Aguirre, & Velasco, 2007; Eastman, 2004).

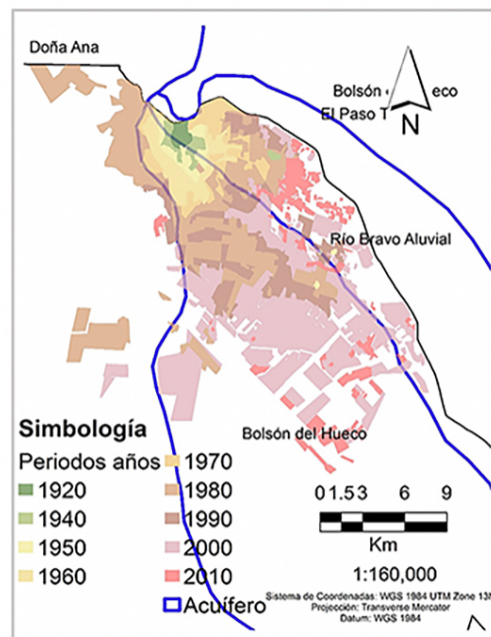


Figura 4. Crecimiento urbano histórico de Ciudad Juárez (1920-2010) y acuíferos Bolsón del Hueco y Aluvial del Río Bravo subyacen en ella.

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el IMIP.

Una vez obtenida la información para cada uno de los años analizados (1920-2015), se determinó la evolución temporal y espacial del crecimiento acumulado promedio en periodos de 10 años, evitando traslapes de áreas. Con esta información, se determinó la Tasa de Cambio del Crecimiento Urbano Histórico (TCCUH: %) para cada uno de los periodos analizados, mediante la ecuación propuesta por FAO (1996) (ecuación 1) en Velázquez *et al.* (2002).

**Ecuación 1.** Estimación de la dinámica de cambio en función del uso de suelo y crecimiento urbano  
Velázquez *et al.* (2002)

$$\delta_n = \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1$$

Donde:  $\delta$  es la tasa de cambio (para expresar en %, se multiplica por 100).

$S_1$  es la superficie en fecha 1.

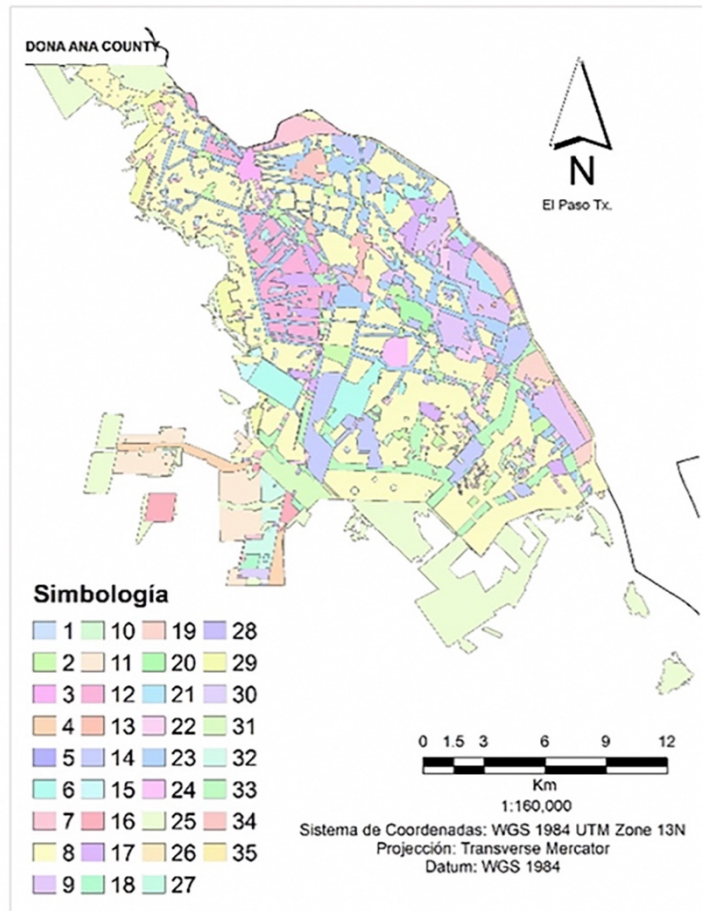
$S_2$  superficie en fecha 2.

$n$  es el número de años entre las dos fechas.

## Análisis de la evolución temporal y espacial de las coberturas y usos de suelo urbanos (1920-2015)

El segundo objetivo, al igual que en el apartado anterior, se desarrolló a través del análisis espacial y los SIG, apoyados en los polígonos de área de crecimiento urbano resultantes del primer objetivo. Posteriormente, mediante el módulo *Spatial Analysis* se analizaron las distintas categorías de usos de suelo urbano y su evolución espacial y temporal, obteniéndose así las coberturas y usos de suelo urbanos por periodos, usando como insumo la base de datos desarrollada en el año 2010, por la Dirección de Servicios Públicos Municipales (DSPM), a través de la coordinación de planeación y geo informática (figura 5). Después, aplicando la ecuación 1 propuesta por FAO (1996), se determinaron las Tasas de Cambio de Uso de Suelo Urbano (TCUSU: %) a partir de los tipos de suelo que presentaron mayores cambios, obteniéndose finalmente las TCUSU en porcentaje, y estas fueron convertidas a formato Ráster.





**Figura 5.** Distribución espacial de las coberturas y uso de suelo urbanos (2015). Fuente: Elaboración propia con datos de la DSPM. (1).-Centro De Barrio; (2).-Centro Distrito; (3).-Centro Urbano; (4).-Corredor Controlado Regional; (5).-Ejido; (6).-Equipamiento; (7).-Espacio Abierto; (8).-Habitacional; (9).-Habitacional Ecológica; (10).-Habitacional En Corredor Urbano; (11).-Habitacional Suburbana; (12).-Habitacional Tradicional; (13).-Hiamb; (14).-Industria; (15).-Industria Aislada O De Alto Riesgo; (16).-Industria De Riego Existente; (17).-Industria En Parque O Agrupada; (18).-Industria Toxica De Riesgo; (19).-Ipe; (20).-Limite De Colonia; (21).-Limite De Ejido; (22).-Mixto Servicios/Equipamiento; (23).-Mixto Servicios/Habitacional; (24).-Mixto Servicios/Habitacional/Industria; (25).-No Definido; (26).-Planta De Tratamiento De Aguas; (27).-Pozo De Infiltración; (28).-Pozos De Infiltración; (29).-Reserva; (30).-Servicio Bioinfecto-Contagioso De Alto Riesgo; (31).-Servicios De Transición; (32).-Servicios E Industria Potencialmente Contaminante En Riesgo; (33).-Servicios Generales; (34).-Subcentro Urbano; (35).-Zona De Proyectos Especiales.

## Determinación de la evolución temporal y espacial del abatimiento del acuífero Bolsón del Hueco

Existen diversas metodologías para analizar la evolución temporal y espacial del abatimiento de acuíferos, así como para determinar las tasas de cambio anual de los niveles estáticos (Alatorre *et al.*, 2014; Rascón & Moreno, 1998; Velázquez *et al.*, 2002).

En este caso, se analizó el comportamiento temporal y espacial del acuífero del Bolsón del Hueco que subyace a la parte urbana del municipio de Juárez; fue necesario evaluar distintos métodos de interpolación (Alatorre *et al.*, 2014). Se contó con bases de datos de niveles estáticos de estudios geohidrológicos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) de Ciudad Juárez en mapas en formato pdf. Para estos años existía información de isolíneas, estas fueron georreferenciadas, digitalizadas y convertidas en vértices.

Después, se analizaron por medio del módulo de *Geostatistical Analysis* en el software ArcMap 10.3, se evaluaron todos los métodos de interpolación, determinísticos *Inverse Distance Weighting* (IDW), *Global Polynomial Interpolation* (GPI), *Radial Basis Functions* (RBF), *Local Polynomial Interpolation* (LPI) y los métodos geoestadísticos como *Kriging/ Cokriging* (*Ordinary, Simple, Universal, Indicator, Probability* y *Disjunctive*) y *Empirical Bayesian Kriging* (EBK), y para determinar el mejor método de interpolación, se revisaron los estadísticos de prueba resultantes (error medio y error cuadrático medio). Dicho proceso se aplicó a las bases de datos del periodo de 1975-2015, en intervalos de 10 años (figura 6).

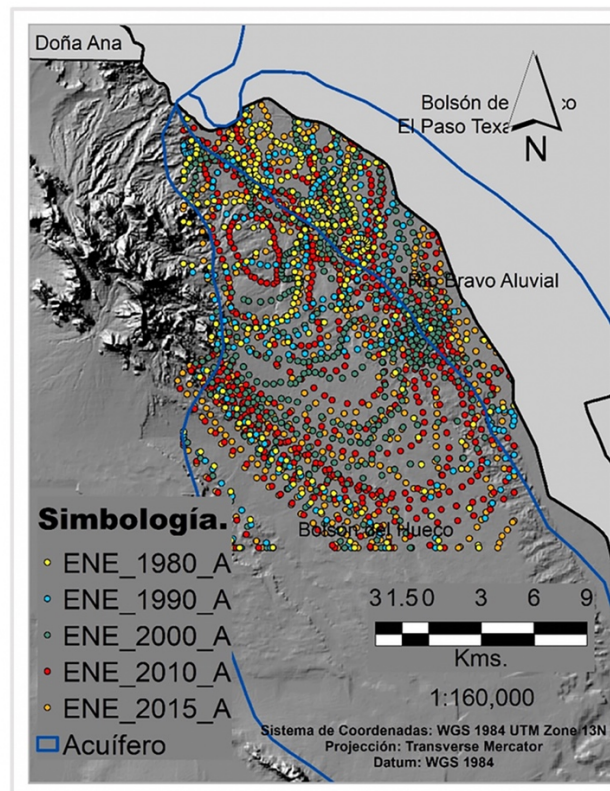


Figura 6. Datos de elevación de niveles estáticos (msnm), a partir de los cuales se realizaron las interpolaciones de acuerdo con los resultados de prueba obtenidos con el módulo *Geostatistical Analyst*.  
Fuente: Elaboración propia con datos de JMAS.

Una vez elegido el método de interpolación, se generaron las cartografías de abatimiento en formato ráster. Finalmente, para la determinar la Tasa de Cambio del Abatimiento en metros anuales (TCA: m año<sup>-1</sup>), se aplicó la siguiente ecuación:

**Ecuación 2.** Tasa de Cambio del Abatimiento (TCA: m año<sup>-1</sup>) Alatorre et al. (2014).

$$TCA = \frac{(Nivel\ final - Nivel\ Inicial)}{Número\ de\ años\ del\ periodo}$$

## Correlación entre las covariables espaciales y temporales analizadas

Para determinar los impactos espaciales y temporales que han presentado el crecimiento de la Población, TCCUH, TCUSU, sobre las TCA, se realizó un análisis estadístico espacial y se determinaron

las correlaciones espaciales entre covariables (Mondragón, 2014). Apoyados en el *software* de ArcMap10.3 se lanzaron aleatoriamente 100 puntos por cada periodo analizado para determinar la TCCUH (10 periodos de crecimiento), resultando un tamaño de muestra de 1 000 puntos. Vale aclarar que estos puntos permitieron obtener los valores de las variables analizadas (en cada uno de los píxeles), para así poder determinar las correlaciones espaciales y temporales estadísticamente significativas. Finalmente, al utilizar los límites geográficos del acuífero del Bolsón del Hueco, el análisis de correlación se determinó solamente con 922 puntos; posteriormente, se replicaron los puntos sobre las TCUSU (%), abatimientos (m) y población histórica.

Como un paso intermedio, se determinó si el tipo de análisis que se debía aplicar era paramétrico o no paramétrico, para ello se aplicó la prueba de Kolmogórov-Smirnov (Lilliefors, 1967), y los resultados mostraron que las covariables tenían un comportamiento no normal. Este resultado permitió determinar que el análisis de correlación bivariado Rho de Spearman fue el más adecuado para analizar el nivel de correlación entre las covariables y su nivel de significancia estadística (Mondragón, 2014).

## Resultados

### Análisis del crecimiento urbano (1920-2015)

En la (figura 7) se muestra la cartografía del crecimiento urbano presentado del 2010-2015, el cual fue de aproximadamente 7 227 ha. Ahora bien, analizando todos los periodos de crecimiento urbano histórico desde 1920-2015 (figura 8), se puede observar que el crecimiento total acumulado fue de 35 222 ha aproximadamente. Por otra parte, se muestra cómo el periodo comprendido entre 1990-2000 fue cuando Ciudad Juárez presentó un crecimiento muy significativo de aproximadamente 10 378 ha.

En cuanto a la evolución espacial, se observa un comportamiento de expansión integrada en el periodo de 1920 a 1960; sin embargo, a partir del periodo 1960-1970, la configuración del crecimiento presenta cambios importantes, observándose un comportamiento disperso en dirección Suroriente de la mancha urbana, principalmente sobre los márgenes del Rio Bravo, así como las llanuras de inundación, lo cual probablemente está afectando la recarga de los acuíferos somero y profundo (Cervera, 2007; Heywood & Yager, 2003), ya que de acuerdo con López-Álvarez *et al.* (2014). Es claro que el cambio de usos de suelo incrementa el riesgo de abatimiento.

Este patrón espacial ha sido una constante histórica y ha normado la forma del crecimiento disperso en prácticamente toda la ciudad, con sus puntuales excepciones donde la ciudad ha crecido en dirección Noroeste (1960-1970, 1970-1980 y 2010-2015), Oeste (2000-2010 y 2010-2015) y Suroeste (1970-1980, 1990-2000 y 2010-2015) en las cercanías de la zona limítrofe con los Estados Unidos de América (Anápra), Sierra de Juárez y Granjas Santa Elena, respectivamente. Coincidiendo con cinturones de pobreza, segregación socio espacial, urbanización acelerada e incremento de asentamientos humanos sin la planeación adecuada, potencia aún más los niveles de marginación y olvido de sus pobladores en cuanto a los servicios básicos se refiere: como la dotación de agua potable, higiene, seguridad pública, servicio de salud, transporte y alumbrado público (Barraza *et al.* 2009; Chávez, 2013; González, 2017; Swyngedouw, 1995).

Además, se observa la ausencia de una planeación sistemática integral que ha favorecido la expansión de una ciudad carente de infraestructura básica (Swyngedouw, 1995). De acuerdo con Barraza (2009), esto se ha reflejado en las periferias, atribuyéndose en general a limitaciones económicas de la población migrante, que los limita del acceso a terrenos urbanizados, obligándoles a asentarse en áreas

agrícolas y topografía accidentada, marginándoles de la infraestructura y mantenimiento, lo que reflejaría y expondría también la especulación del suelo por inmobiliarias

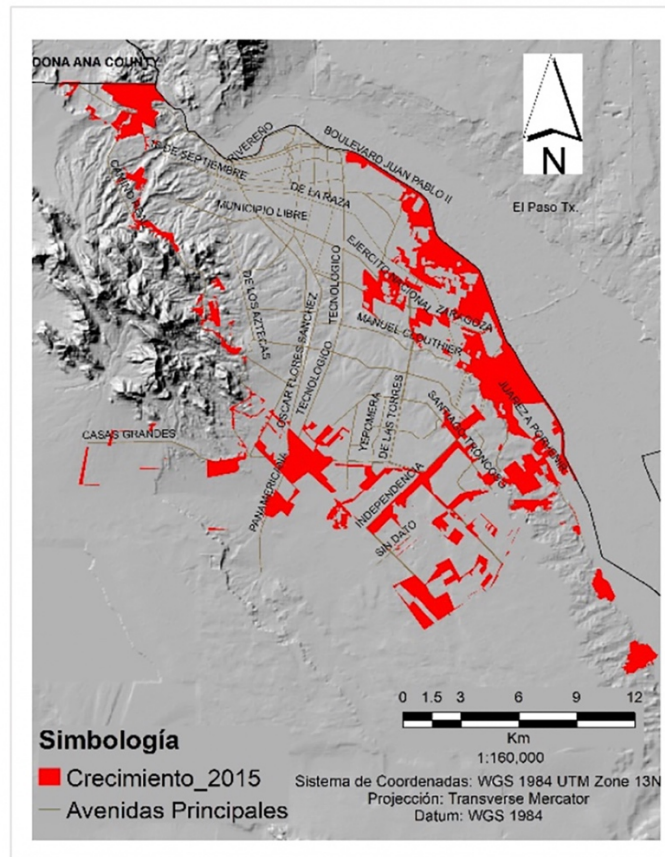


Figura 7. Cartografía del crecimiento urbano presentado del 2010-2015.  
Fuente: Elaboración propia.



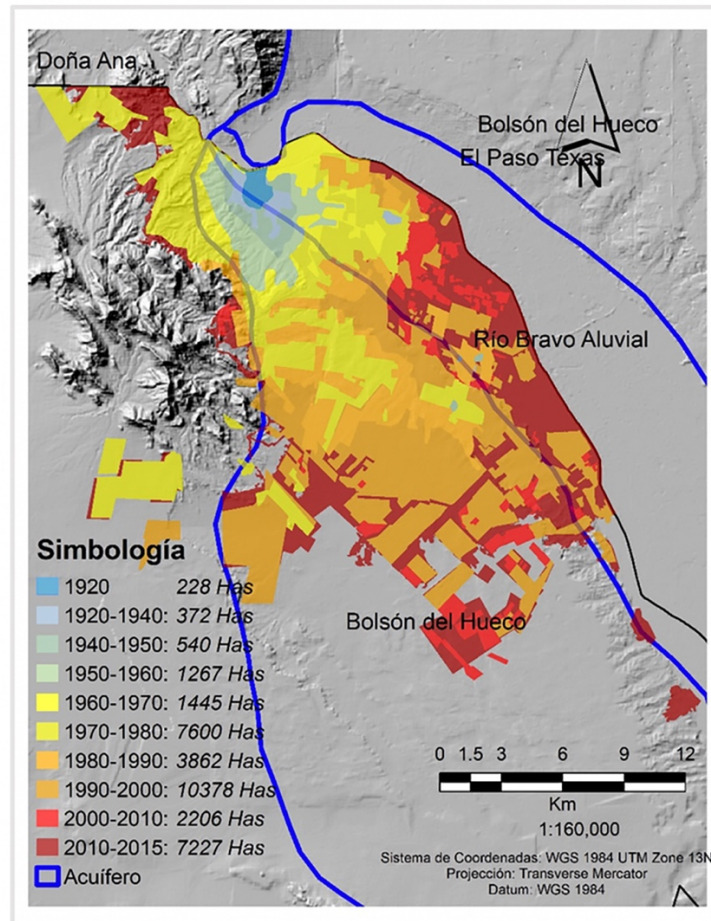


Figura 8. Áreas del crecimiento urbano histórico de Ciudad Juárez.  
Fuente: Elaboración propia.

Se calcularon las TCCUH para cada periodo (figura 9) (Velázquez *et al.*, 2002). Se observan, a diferencia de la figura 8, las dinámicas de cambio expresadas en porcentajes. El periodo de 1920 a 1950 muestra un comportamiento espacial integrado y creciente próximo a la tasa media de 16.8%, y mayor a este en los periodos 1950-1960, 1970-1980, 1990-2000 y 2010-2015. Estos últimos se observan espacialmente en la mayor parte de la zona urbana. Además, los periodos 1960-1970, 1980-1990 y 2000-2010 muestran valores bajos en relación con la media en un rango de 1.9% a 7.88%, mostrando un comportamiento espacialmente disperso, principalmente, en áreas del Este y Sur de la mancha urbana.

Estas diferencias explican perfectamente que la ciudad ha obedecido a factores de especulación del suelo y expansión (Barraza *et al.*, 2009). Analizando la evolución espacial y temporal, se observan tasas de cambio en colores rojo y naranja con un rango y orden oscilante del 12.8% correspondiente al periodo 2010-2015 y 6.1% para el periodo 2000-2010. Los periodos restantes representados en colores naranja claros, amarillos y azul claro muestran un comportamiento en rango y orden de 3.4% (1980-1990), 2.96% (1960-1970), 2.18% (1940-1950), 1.93% (1920-1940), 1.41% (1970-1980), 0.9% (1990-2000) y finalmente 0.7% (1950-1960). Si bien se observa que el periodo del 1990-2000 presenta una mayor área de crecimiento, el periodo del 2010-2015 presentó mayor dinamismo en sus porcentajes.

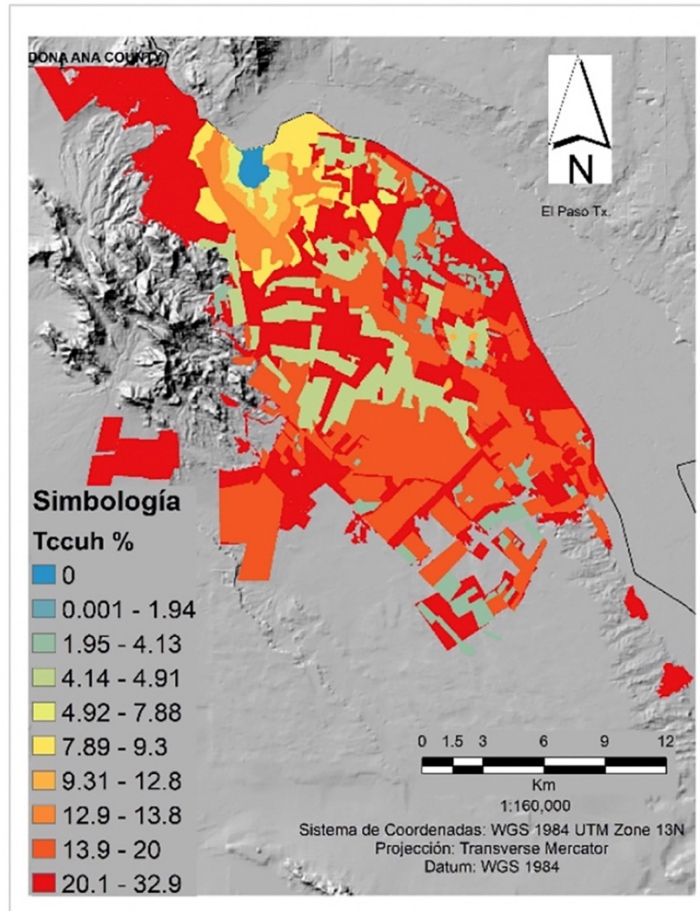


Figura 9. Tasas de cambio del crecimiento urbano histórico (TCCUH: %) (1920-2015).  
Fuente: Elaboración propia.

## Análisis de la evolución temporal y espacial de las coberturas y usos de suelo

### desarrolladas dentro del área urbana

A partir de la distribución espacial de las coberturas y usos de suelo urbano (figura 5) y áreas de crecimiento urbano (figura 8) se construyó la evolución temporal y espacial de coberturas y usos de suelo urbano en el periodo 1920-2015 (figura 10). Las categorías que presentan mayor crecimiento espacial y temporal son las habitacionales con un 45.3%, usos no definidos 12.4%, mixto servicios / habitacional 11.3% e industrial 7.9%. En general, estas categorías agrupan en conjunto el 77.1% del total. Este resultado, muestra cómo solo cuatro categorías de 24 son las que más desarrollo han presentado en Ciudad Juárez históricamente.



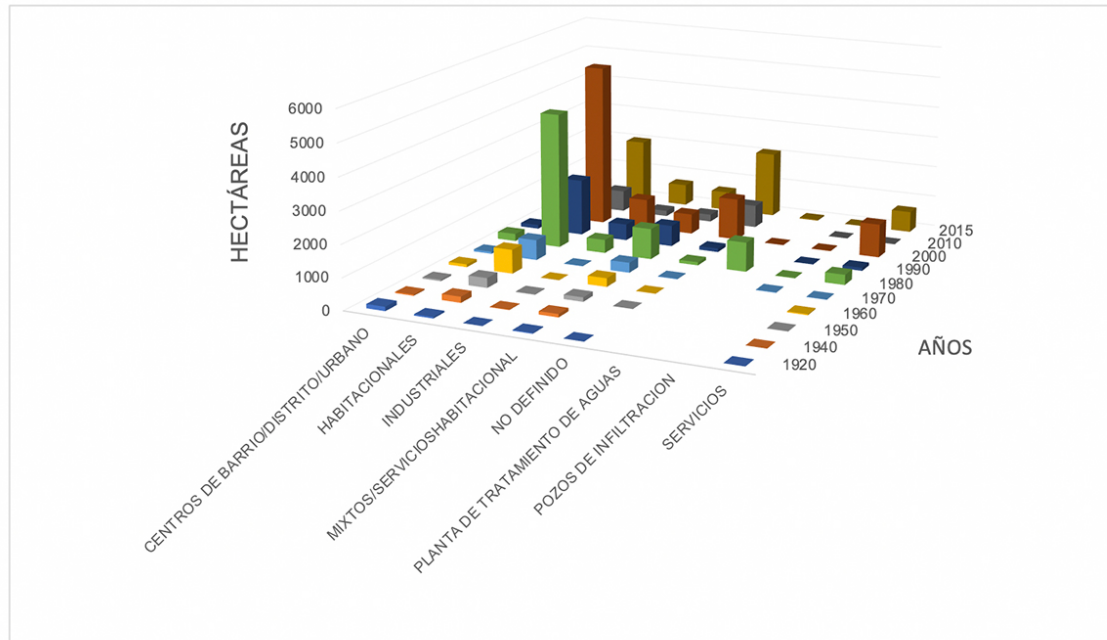


Figura 10. Evolución espacial y temporal de las coberturas y usos de suelo urbano más significativas.  
Fuente: Elaboración propia.

También se determinó la TCUSU (figura 11). De acuerdo con la distribución espacial de los valores obtenidos, se observa un patrón muy complejo en el desarrollo de las distintas coberturas y usos de suelo de Ciudad Juárez. En general, las TCUSU que dominan la zona urbana se observan en el rango del 10.4% al 17.7%, representando aproximadamente un 50% del área total (tonos amarillos). El 28% del área restante es dominada por tasas que oscilan entre el 2% al 5%, siendo estas las que menor tasa de cambio manifiestan y su distribución espacial no es homogénea dentro del área urbana (tonos azul claro). El 32% restante se divide en porcentajes similares de área del 15% con tasas del 20% al 43 % representadas en tonos naranja (su comportamiento es disperso y las áreas de mayor porcentaje de cambio se localizan en la periferia al Suroeste de la zona urbana y al Oriente próximas al límite político internacional) y de 0% en tono azul, estas últimas representan la aparición de nuevos usos de suelo (su distribución espacial es similar a la anterior). Finalmente, se observan tres áreas mínimas puntuales con tasas oscilantes entre 43% y 188% ubicadas en el Centro Norte, Este y Oeste de la mancha urbana.

Los resultados se agrupan bajo la categoría *habitacional*, en los usos: habitacional, habitacional tradicional, habitacional mixto y mixtos de servicio habitacional. Ahora, observando las TCUSU, se aprecia la evolución de las categorías en el tiempo: los periodos 1940-1960 dominaron en general el equipamiento con el 17% en el primero, los usos habitacionales con el 16.5%, 14.3% y 11% en promedio, respectivamente, representados por los colores naranja y amarillo, y nuevos usos de suelo (Centro de distrito, centros de barrio, industrial, centro urbano, servicios generales y subcentro urbano) en color azul. De 1960-1970 y 1990-2015 el uso habitacional muestra un comportamiento similar con una reducción en su tasa al 4%, 6%, 5% y 9% en promedio, respectivamente, y se observan nuevos usos (industrial en parque agrupado y de servicios generales). Para el periodo 1970-1980 y 1990-2000, el uso habitacional muestra un incremento del 12% en su tasa de cambio, se observan usos industriales y de alto riesgo con un 22% y 187%, respectivamente, este último en la porción Oeste próximo a la sierra de Juárez, y finalmente un 20% en el periodo de 1990-2000. En 1980-1990 domina espacialmente el uso habitacional ecológico, observando una

importante tasa del 30% en color naranja al Este, seguido de los usos equipamiento, industrial en parque agrupado, servicios mixtos y equipamiento con un 8% de cambio.

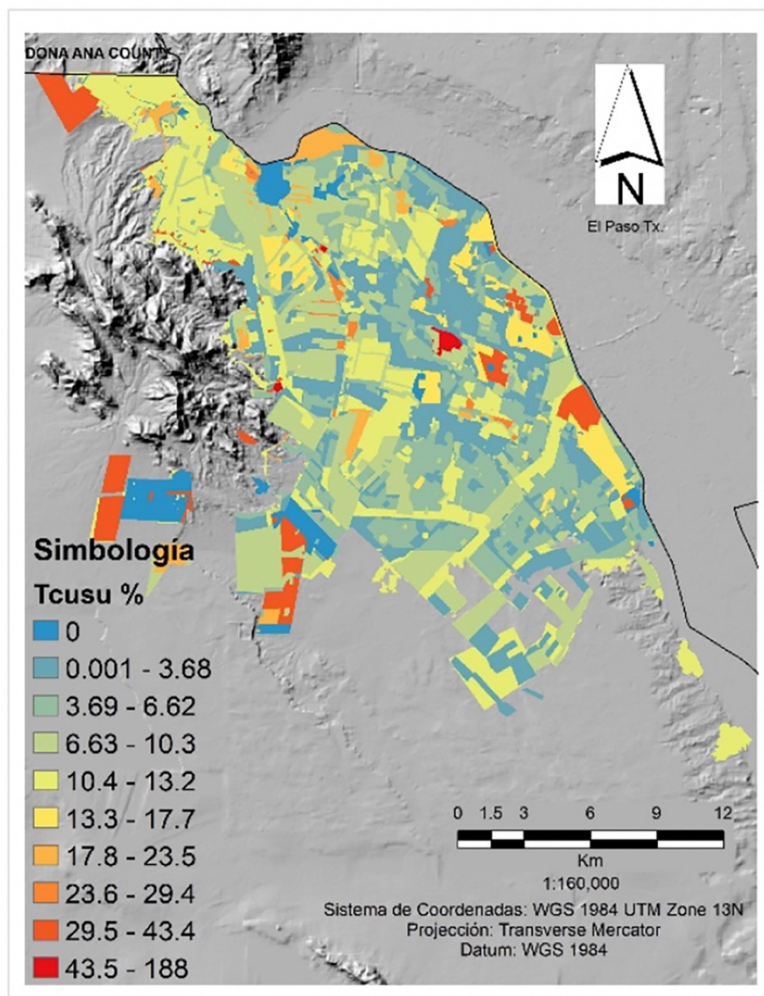


Figura 11. Tasa de cambio de uso de suelo urbano (TCUSU: %) de Ciudad Juárez.  
Fuente: Elaboración propia.

Como un paso intermedio para determinar la evolución espacial y temporal del abatimiento del acuífero del Bolsón del Hueco, se analizaron los resultados de los estadísticos de prueba resultantes para cada uno de los métodos de interpolación contenidos en el módulo *Geostatistical Analyst* (tabla 1). De acuerdo con los valores del error medio y error medio cuadrático, el mejor método de interpolación fue el Empírico Bayesiano de Kriging.

**Tabla 1.** Estadísticos de prueba y resultados empleados para determinar el mejor método de interpolación predictor de los niveles estáticos del acuífero Bolsón del Hueco en su parte mexicana, periodo 1975-2015.

Métodos determinísticos		IDW	GPI	RBF	LPI			
1975	Error Medio	-0.12959	-0.00736	-0.00414	0.02210			
1975	Error cuadrático medio (rmse)	1.58854	8.68130	0.40840	0.34960			
1980	Error Medio	-0.25375	-0.00910	-0.02979	0.03022			
1980	Error cuadrático medio (rmse)	1.74894	9.94608	0.44131	0.30390			
1990	Error Medio	-0.23796	-0.02201	-0.04617	0.04072			
1990	Error cuadrático medio (rmse)	1.95068	11.88526	0.76585	0.51894			
2000	Error Medio	-0.24217	-0.02173	-0.11718	0.09766			
2000	Error cuadrático medio (rmse)	2.19065	13.81570	1.12016	0.74541			
2010	Error Medio	-0.29248	-0.01875	-0.00382	0.04796			
2010	Error cuadrático medio (rmse)	2.82922	16.85490	1.37558	0.73860			
2015	Error Medio	-0.08871	-0.02705	-0.06448	-0.00720			
2015	Error cuadrático medio (rmse)	2.76602	18.66257	1.07839	1.04948			
<b>Kriging</b>						<b>Interpolación con barreras</b>		
Métodos geoestadísticos		Ordinario	Simple	Universal	Disyuntivo	Empírico Bayesiano de Kriging	Kernel Suavizado	Difusión de Kernel
1975	Error Medio	0.13519	-0.01008	0.13519	-0.13426	-0.02221	0.04745	-0.24503
1975	Error cuadrático medio (rmse)	1.30002	0.54699	1.30002	0.68288	0.43031	0.78793	2.94253
1980	Error Medio	0.11467	0.19571	0.11467	-0.19204	-0.01177	0.08290	-0.34628
1980	Error cuadrático medio (rmse)	1.26763	1.98352	0.07381	1.88563	0.44720	0.88394	3.10887
1990	Error Medio	0.16692	0.16864	0.16692	-0.02540	-0.01712	0.03931	-0.38539
1990	Error cuadrático medio (rmse)	1.34971	1.53894	1.34971	1.31866	0.61038	0.06982	3.90257
2000	Error Medio	0.08315	0.67236	0.08315	-0.10239	0.03177	0.26114	-0.40118
2000	Error cuadrático medio (rmse)	1.67705	2.77869	1.67705	2.42943	0.64525	0.16367	4.92670
2010	Error Medio	0.01623	0.33390	0.01623	0.06520	0.02301	0.01834	-0.37973
2010	Error cuadrático medio (rmse)	0.88658	2.29454	0.88658	2.10499	0.77754	0.98022	5.36406
2015	Error Medio	-0.00398	0.30102	-0.00398	-0.02567	0.00195	-0.06524	-0.15966
2015	Error cuadrático medio (rmse)	0.95796	2.53261	0.95796	2.39934	0.98159	1.48781	6.05809

Fuente: Elaboración propia con base a información proporcionada por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) de Ciudad Juárez.

Una vez definido el método de interpolación, se generaron las cartografías del nivel estático desde 1975-2015 (figura 12). Se observa una disminución generalizada de los niveles estáticos en la parte Norte y Oeste del área de estudio; observándose la aparición y evolución de conos de abatimiento con dirección Este en los periodos (1975, 1980 y 1990), con abatimientos de hasta 16 m; a la vez, el comportamiento hacia el Este sureste muestra un abatimiento pero en menor grado; finalmente, se observa una evolución positiva importante de los niveles estáticos en la porción Sur durante estos tres periodos y hacia el Este en 1980.

Ahora bien, en los periodos 2000, 2010 y 2015, el comportamiento del cono de abatimiento se generaliza al centro del área de estudio con dirección Norte-Sureste, mostrando una tendencia similar al periodo anterior en abatimientos máximos próximos a los 16 m, a la vez que se observa que la sección del Río Bravo límite del área de estudio al Norte se convierte en un factor importante de recarga al acuífero. Por otra parte, la zona Sur continúa mostrando una evolución positiva en sus niveles estáticos. En resumen, se observa un abatimiento próximo a los 50 m y la evolución espacial del cono de abatimiento tiende a estabilizarse al centro del área de estudio.

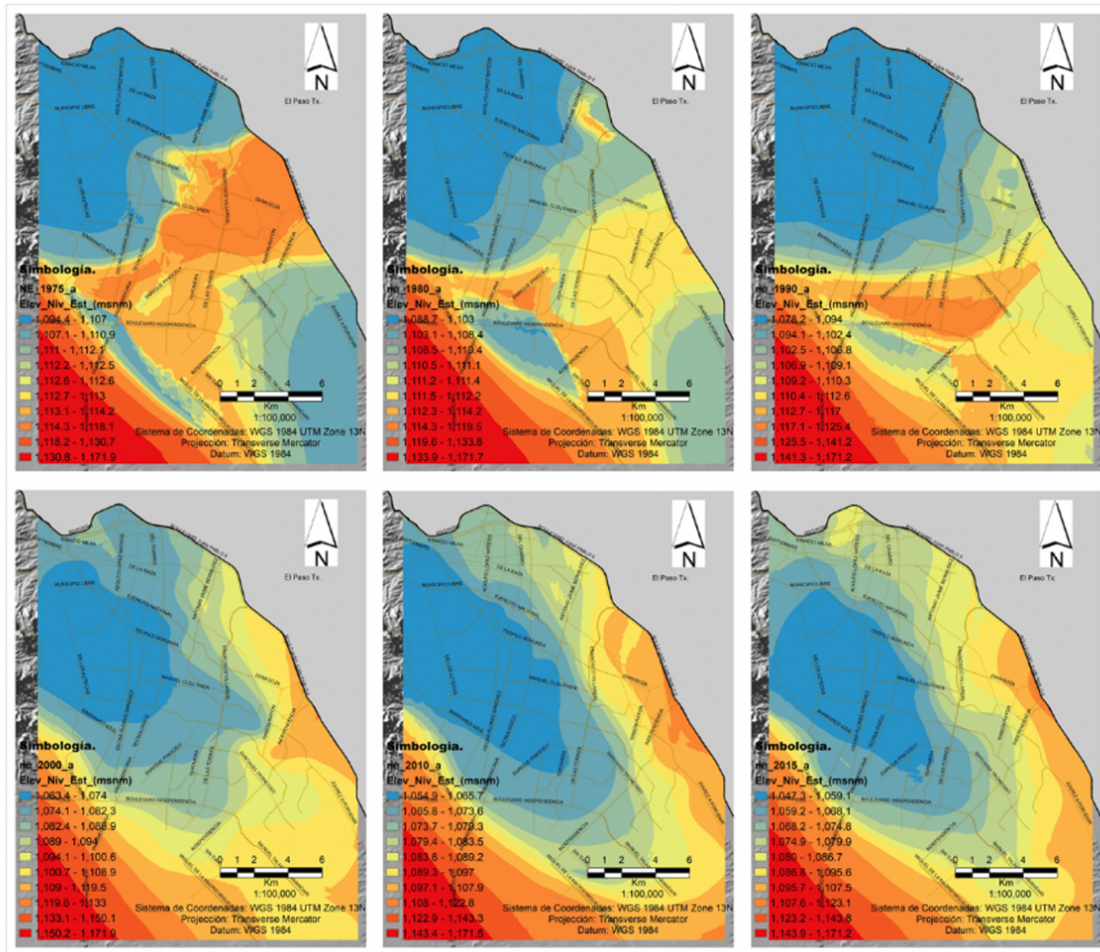


Figura 12. Niveles estáticos interpolados resultantes a partir del método Empírico Bayesiano de Kriging en formato Ráster (periodos 1975, 1980, 1990, 2000, 2010 y 2015, respectivamente).  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, y con estas cartografías, se determinaron las TCA (figura 13) (Alatorre *et al.*, 2014). Se observan TCA promedio de  $-0.53 \text{ m año}^{-1}$  y máximos de hasta  $-3.6 \text{ m año}^{-1}$ , conos de abatimiento y un comportamiento dinámico no puntual en dirección Sureste y Sursureste en los periodos 1975-1980, 1980-1990 y 1990-2000. Por otra parte, el periodo 2000-2010 explica la evolución mostrada hacia el Sureste, definiendo tres zonas con máximos de hasta  $-3.25 \text{ m año}^{-1}$  y un promedio de  $-0.84 \text{ m año}^{-1}$ ; aparecen dos importantes zonas de recuperación que en periodos anteriores mostraron conos de abatimiento importantes, ubicados al Norte y Noreste. El periodo 2010-2015 define cinco zonas de abatimiento, por primera vez, cercana a la sierra de Juárez, Centro sur, Noreste, Este y Sursureste, con máximos de  $-1.52 \text{ m año}^{-1}$  y un promedio de  $-0.29 \text{ m año}^{-1}$ ; sin embargo, aparecen zonas que mantienen una tasa importante



de recuperación. Finalmente, el periodo 1975-2015 muestra el comportamiento de las TCA promedio anual máximo oscilante entre (-1.5 m año<sup>-1</sup> y -1.1 m año<sup>-1</sup>).

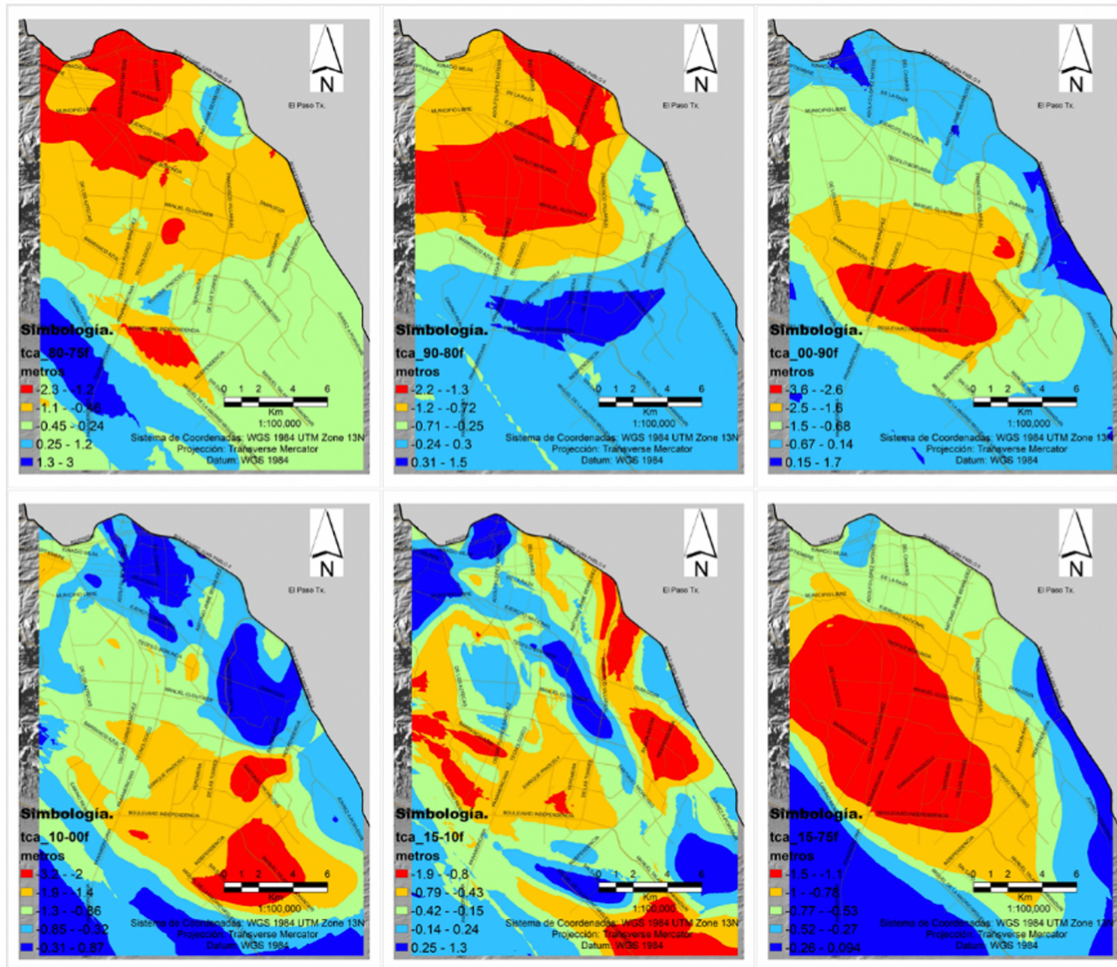


Figura 13. Tasas de cambio de abatimiento (TCA m año<sup>-1</sup>) 1975, 1980, 1990, 2000, 2010 y 2015.  
Fuente: Elaboración propia.

### Análisis espacial de la correlación estadística de las covariables.

Finalmente, en este apartado se analizan los resultados de la correlación estadística que se tienen entre todas las covariables analizadas y el análisis se realizó en términos de explicar la evolución temporal y espacial de las TCA para cada uno de los periodos analizados (1975-2015). Primero, en la tabla 2 se muestran los resultados de la prueba de normalidad aplicada a la muestra aleatoria de 922 puntos. Dado que el nivel de ajuste a la prueba no paramétrica de Kolmogórov-Smirnov resultó con un nivel de significancia de  $p \leq 0.05$  para todas las covariables, se concluye que las covariables analizadas tienen un comportamiento no normal; por lo tanto, y para determinar la correlación estadística entre las covariables, se aplicó la correlación bivariada de Rho de Spearman. Los resultados de las correlaciones bivariada se muestra en la tabla 3.

**Tabla 2.** Prueba de normalidad de datos de acuerdo con Kolmogórov-Smirnov.

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>		
	Estadístico	gl	Sig.
Población	0.176	922	0.000
Tcusu %	0.176	922	0.000
Tccuh %	0.183	922	0.000
Tca_80-75	0.207	922	0.000
Tca_90-80	0.177	922	0.000
Tca_00-90	0.214	922	0.000
Tca_10-00	0.220	922	0.000
Tca_15-10	0.216	922	0.000
Tca_15-75	0.223	922	0.000

a. Corrección de significación de Lilliefors

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.** Coeficientes de correlación bivariada de Rho de Spearman y nivel de significancia.

		Correlaciones								
		Población %	Tcusu %	Tccuh %	Tca_80-75	Tca_90-80	Tca_00-90	Tca_10-00	Tca_15-10	Tca_15-75
Rho de Spearman	Población%	1	-0.02	0.423**	-0.606**	-0.302**	-0.175**	-0.307**	0.803**	0.043
			0.624	0	0	0	0	0	0	0.188
			922	922	922	922	922	922	922	922
	Tcusu%	-0.016	1	0.461**	0.187**	0.329**	0.016	0.149**	0.126**	0.244**
		0.624		0	0	0	0.629	0	0	0
		922	922	922	922	922	922	922	922	922
	Tccuh%	0.423**	0.461**	1	-0.112**	-0.022	0.169**	-0.186**	0.509**	0.178**
		0	0		0.001	0.501	0	0	0	0
		922	922	922	922	922	922	922	922	922
	Tca_80-75	-0.606**	0.187**	-0.112**	1	0.615**	0.077*	-0.170**	-0.632**	0.04
	0	0	0.001		0	0.019	0	0	0.22	
	922	922	922	922	922	922	922	922	922	
Tca_90-80	-0.302**	0.329**	-0.02	0.615**	1	0.203**	-0.223**	-0.393**	0.264**	
	0	0	0.501	0		0	0	0	0	
	922	922	922	922	922	922	922	922	922	
Tca_00-90	-0.175**	0.016	0.169**	0.077*	0.203**	1	0.502**	0.053	0.883**	
	0	0.629	0	0.019	0		0	0.109	0	
	922	922	922	922	922	922	922	922	922	
Tca_10-00	-0.307**	0.149**	-0.186**	-0.170**	-0.223**	0.502**	1	-0.120**	0.582**	



	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0	0	0	0	
	N	922	922	922	922	922	922	922	922	
Tca_15-10	Coefficiente de correlación	0.803**	0.126**	0.509**	-0.632**	-0.393**	0.053	-0.120**	1	0.197**
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0	0.109	0		0
	N	922	922	922	922	922	922	922	922	922
Tca_15-75	Coefficiente de correlación	0.043	0.244**	0.178**	0.04	0.264**	0.883**	0.582**	0.197**	1
	Sig. (bilateral)	0.188	0	0	0.22	0	0	0	0	
	N	922	922	922	922	922	922	922	922	922

\*La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral). \*\*La correlación es significativa en el nivel 0.01 (bilateral).

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla 3 muestran la covariable TCA para cada uno de los periodos analizados (tasas de cambio del abatimiento; periodos 1975-1980, 1980-1990, 1990-2000, 2000-2010 y 2010-2015), así como la TCA para todo el periodo (1975-2015). Además, se pueden observar las correlaciones y su nivel de significancia estadística con cada una de las covariables utilizadas, TCCUH, TCUSU y la evolución de la población (Población: %). En general, para TCA de 1975-2015, se observa que las covariables que tienen una correlación estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ) son TCCUH y TCUSU. Por otra parte, la población no muestra tener un impacto en las TCA (1975-2015). En este caso, si bien la TCCUH (expansión urbana) explica la tendencia que ha mostrado el acuífero en sus niveles de abatimiento (Coef. de correl. = 0.18), se encuentra que la TCUSU (Coef. de correl. = 0.24) presenta un nivel de correlación más elevado, lo cual se traduce en que, si bien la expansión urbana es un factor importante para explicar el abatimiento, estos resultados demuestran que en el periodo de 1975-2015 los impactos más severos se deben principalmente al crecimiento de usos de suelo urbano que demandan una mayor cantidad de agua; en este caso, los más significativos fueron los habitacionales e industriales, hipótesis que se robustece al observar los resultados de la figura 10.

Tratando de explicar los distintos escenarios presentes desde 1975-2015, a continuación, se detallan algunos periodos internos agrupados por comportamientos similares. Por ejemplo, en los periodos de 1975-1980 y 2000-2010 el abatimiento de acuífero muestra tener correlación estadísticamente significativa entre las tres covariables analizadas, población, TCUSU y TCCUH. De acuerdo con los valores de los índices de correlación y su signo respectivo, se deduce que el factor que tuvo mayor impacto en el abatimiento es la TCUSU, el cual muestra un valor de correlación positivo, seguido en orden descendente por la covariable Población que muestra un valor de correlación negativo considerable y la TCCUH con un valor de correlación negativo medio (Mondragón, 2014).

De acuerdo con estos resultados, se puede decir que en esos periodos, si bien la población aparenta no ser es un factor importante en la demanda del agua como se podría esperar, se deduce que existe un 40% de peso que se le pudiera atribuir a variables explicativas no consideradas en este análisis; sin embargo, aparecen de nueva cuenta, al igual que en la figura 10, algunos usos de suelo que muestran una demanda significativa que se pueden asociar a los habitacionales e industriales ahora a través de la TCUSU.

En el caso de la TCCUH, al igual que la covariable de Población, muestra una correlación negativa con respecto al abatimiento, lo cual puede deberse a que la expansión urbana no era tan significativa como la demanda ejercida por la agricultura o las condiciones climáticas de sequía (por ejemplo., 2000-2010), en

donde Ciudad Juárez presentó, de acuerdo al Monitor de Sequía en México (MSM), sequía excepcional (Monitor de Sequía en México (MSM), 2018), siendo esta la de mayor intensidad.

A diferencia de lo encontrado en los periodos 1975-1980 y 2000-2010, en los años de 1980-1990 se encuentra que el abatimiento tiene una correlación estadísticamente significativa con las covariables TCUSU y Población. Los índices de correlación demuestran que la TCUSU tiene un mayor impacto en el abatimiento (Coef. de correl. = 0.32), y en segundo lugar se encuentra la población (Coef. de correl. = -0.30), aunque este último al igual que el periodo de 1975-1980 también presenta una correlación negativa media con el abatimiento, con lo que se deduce que existe un 37% de peso que existen otras variables explicativas no consideradas dentro de este periodo. Con base en, a estos resultados, y a lo encontrado en el periodo 1975-1980, donde la población era la covariable más importante, aunque en orden inverso (Coef. de correl. = -0.60), en este periodo empiezan a afianzarse algunas coberturas y usos de suelo urbano que son altamente demandantes de agua, incluso superando el efecto de la población. En el caso de TCCUH, en este periodo no tiene un impacto, esto demuestra que la expansión urbana, como tal, no se relaciona directamente con el proceso del abatimiento experimentado por el acuífero sino con la aparición de coberturas y uso de suelo altamente demandantes de agua.

En seguida se encuentra el periodo 1990-2000, este periodo muestra algunas particularidades muy importantes si se analiza el comportamiento que han venido presentando los valores de los índices de correlación desde el periodo 1975-1980. En este periodo aparece de nuevo la población como la covariable que más correlación presenta con el comportamiento del abatimiento (Coef. de correl. = -0.17), pero en orden inverso; sin embargo, se ve cómo presenta una disminución significativa al observar el valor de correlación que tenía en el periodo 1980-1990 (Coef. de correl. = -0.30). Con respecto a la TCCUH, se observa que es la que mejor explica el impacto sobre el abatimiento (Coef. de correl. = 0.16) al que ejerce la población, incluso se observa que la TCUSU ya no ejerce un impacto significativo. En general, en este periodo, el incremento de la población llevó a una expansión urbana, lo cual seguramente tuvo un impacto negativo en la recarga del acuífero por el incremento de área impermeable.

Finalmente, en el periodo 2010-2015, la población presenta un índice de correlación positiva (Coef. de correl. = 0.80) con el abatimiento, seguido por la TCCUH (Coef. de correl. = 0.50) y, por último, la TCUSU (Coef. de correl. = 0.12). En general, estos valores explican cómo el incremento en la demanda de agua está significativamente relacionado con la TCCUH y TCUSU y, recientemente, con la covariable poblacional. Esto indica que, a partir de este periodo, esta covariable cobra especial interés, ya que parece explicar mejor el abatimiento del acuífero al igual que la covariable de uso de suelo urbano con alta demanda de agua, como en su momento representó el impacto del suelo para actividad agrícola.

## Discusión

El crecimiento urbano observado en Ciudad Juárez se ha dado de forma dispersa y solo ha considerado la disponibilidad del territorio, sin tomar en cuenta la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo, tal y como se ha argumentado en los estudios de Díaz *et al.* (2014), Alatorre *et al.* (2014), y más recientemente de acuerdo al déficit de volumen disponible de agua de 86 500 987 m<sup>3</sup> anuales en el acuífero Valle de Juárez (Conagua, 2015); esto sugiere falta de planeación e interés por la correcta aplicación de políticas de control y planeación.

Este supuesto se robustece de acuerdo con los resultados del análisis del esparcimiento físico, ya que no se observa continuidad en los cinturones de expansión acorde a las necesidades de la ciudad, ni de acuerdo con los planes de desarrollo; ya que la dispersión per se indica estas problemáticas de facto; por lo

tanto, se infiere que la expansión de la ciudad ha sido el vehículo que cataliza una serie de problemáticas que inciden negativamente sobre el comportamiento y evolución de acuífero.

Ahora bien, las TCCUH indican que, en las primeras décadas consideradas en este estudio, la ciudad mantuvo un crecimiento armónico e integrado, sobre todo si se pone especial énfasis en los resultados de cambio del 16%, muy próximos al promedio de 16.8% observado en todo el periodo de análisis y una dinámica homogénea. Sin embargo, a partir de la década de los sesentas, las tasas mostraron un comportamiento de altibajos, ya que el comportamiento de las TCCUH osciló muy por encima del promedio (50-60, 70-80, 90-20 y 10-15) y espacialmente ocuparon la mayor parte de la zona urbana. Por el contrario, las tasas con menor dinamismo (60-70, 80-90 y 0-10) oscilaron entre el 1.9% y 7.8%, representando una menor ocupación, lo que sugiere una dispersión importante, interpretando como los intereses económicos inmobiliarios subyacentes explicarían las problemáticas de crecimiento urbano disperso (Barraza *et al.*, 2009).

Por otra parte, a partir de los resultados obtenidos, se puede observar que las áreas de mayor crecimiento urbano en cuanto a sus usos de suelo fueron: el desarrollo de habitacional, habitacional tradicional, habitacional en corredor urbano, habitacional ecológico, mixto servicios/habitacional, no definido e industrial, por citar algunos. Este último es de especial interés, ya que el desarrollo y crecimiento económico de la ciudad ha sido impulsado principalmente por la industria maquiladora a partir de 1961 por la iniciativa federal y privada a través del Programa Nacional Fronterizo (Pronaf), cuyo propósito fue la promoción del desarrollo económico e industrial en las regiones fronterizas de México (Taylor, 2003), además de lograr las transferencias tecnológicas para hacer crecer y transformar la industria local y nacional que permitiera mejorar la economía fronteriza en la década de los ochentas.

Asimismo, este crecimiento y el auge observado, especialmente a partir de 1970-1971, impulsado y promovido por el gobierno federal como paliativo ante la cancelación del programa bracero en 1964, en conjunto con la disposición de 1973 que eximió a la industria maquiladora el cumplir con la ley que limitaba a solo ser propietarias de 49% de las empresas mexicanas. Esto detonó el incremento de plantas maquiladoras en la región fronteriza, pasando de 120 en 1970 a 455 en 1974. A su vez, se incrementó el número de trabajadores de 20 327 a 75 977 (Taylor, 2003), con los efectos intrínsecos que esto ocasionó en el crecimiento de las ciudades y su población, quienes demandaron una cantidad mayor de recursos como el agua y casa habitación para satisfacer sus necesidades básicas.

Lo anterior hizo surgir una serie de problemáticas que subyacen a este análisis de crecimiento urbano, y que se pudieran asociar con el impacto que las políticas de desarrollo económico, basadas en la industria maquiladora y las tomas de dicciones superficiales han provocado en la explotación desmedida de los recursos naturales. Esto debido a la transición y transformación de usos de suelos territorial natural y agrícola a usos urbanos, sin la debida planificación integral urbano territorial que guíe hacia el desarrollo de una ciudad hídricamente sustentable.

Finalmente, a través de las TCUSU se observó que los usos de suelo urbano habitacionales e industriales observaron un comportamiento sistemático (similar), mostrando valores por abajo del promedio de 9.4% y representando mayor área. Las TCUSU con mayor valor de cambio se observan hacia las orillas de la ciudad con tasas por arriba del promedio, explicando la distribución geográfica dispersa hacia la periferia de los últimos años, a la vez que aparecieron usos de suelo que favorecen la formación de zonas periurbanas o núcleos urbanos delimitados por franjas de suelo de servicios generales y aún no definidos, lo que evidencia que el crecimiento urbano superó la planeación urbana. Lo anterior podría explicar la aparición de nuevos usos destinados a servicios e industria potencialmente contaminante o de alto riesgo, servicios bioinfecciosos y de transición hacia el Sursuroeste y Suroeste cerca de la sierra de

Juárez, con tasas de crecimiento de 187%, 39% y 0%. El común denominador observado en estos últimos usos es la aparición habitacional suburbana e importantes áreas no definidas con tasas de cambio de hasta 10.8%, lo que robustece el supuesto de que el crecimiento urbano (expansión) obedece al crecimiento de los usos de suelo asociados a usos industriales y de servicios. En general, se observan tasas de cambio permanentes cercanas al promedio de 9.4%, las cuales describen el comportamiento de la distribución espacial de los usos de suelo urbano y cuya evolución permite observar la aparición de nuevos núcleos y polígonos como configuradores del espacio.

Ahora bien, las políticas de desarrollo económico convirtieron la localidad en un importante polo de atracción migratoria que oferta mano de obra barata que, asociada a los periodos de devaluación de la moneda mexicana y su ubicación geográfica estratégica, la convirtió en una ciudad altamente competitiva por sus bajos costos de mano de obra; esto garantizó la competitividad en relación con otras ciudades, tal como lo afirmaba (Taylor, 2003). Además, dicha ventaja se asoció una parte en la disposición de suelos, pero sin contemplar la disponibilidad hídrica subterránea como limitante del desarrollo (Díaz *et al.*, 2014). Esto convirtió Ciudad Juárez en una de las ciudades que enfrenta problemas de disponibilidad hídrica y calidad, debido al rápido abatimiento del acuífero en su parte urbana, como lo sostiene McDonald *et al.* (2011b) en su trabajo que aborda la problemática de las disposiciones urbanas con el agua.

Los resultados obtenidos, basados en las TCA, muestran cierta tendencia y un comportamiento dinámico en cuanto a los conos de abatimientos observados en promedio. Este comportamiento puntual, observado en los primeros periodos, se replica hacia las zonas de mayor expansión urbana durante el periodo de estudio y es explicado, en general, por las covariables TCCUH y la TCUSU, donde la covariable poblacional no mostró tener un impacto sobre las TCA excepto por el periodo 2010-2015. Por lo tanto, se deduce que si bien la expansión urbana refleja efectos negativos sobre el abatimiento y la recarga, se observó a través de la TCUSU que se tienen impactos más severos en función del crecimiento de cobertura y usos de suelo urbano y la aparición de usos de suelos que demandan mayor cantidad de agua. Esta hipótesis se robustece de acuerdo con el crecimiento urbano y poblacional observado en el periodo del 2005 al 2010 que, de acuerdo con Sánchez *et al.* (2011), se presentó en dirección Suroriente, estimando la integración de 450 ha de tierra a la ciudad anualmente desde el 2002, donde las tendencias de crecimiento representaron el 70% de la urbanización ocurrida en el mismo periodo de tiempo.

La atracción de 20 000 personas anuales (Sánchez *et al.*, 2011), citando a INEGI (2015), da mayor certeza sobre el comportamiento mostrado del acuífero en su parte mexicana posiblemente a causa de la extracción de la que ha sido objeto, ya que es de esperarse que estas condiciones propiciaran una mayor demanda del recurso hídrico; por lo tanto, los resultados observados hasta ahora parecen indicar lo correcto en cuanto a las TCA y su relación con las TCUSU. En dicho contexto, he aquí la importancia de la utilización de las tasas de cambios registradas por las covariables analizadas, ya que de otra forma resultaría complicado estimar los efectos sobre el acuífero e identificar a qué variables se le pudiera atribuir su impacto diferenciado. En ese sentido, las correlaciones significativas que se plantean en nuestros resultados de análisis estadístico espacial, si bien estos no indican una causalidad, nos explican las tendencias entre las covariables analizadas de TCUSU, TCCUH, Poblacional, Tca\_1975-1980, Tca\_1980-1990, Tca\_1990-2000, Tca\_2000-2010, Tca\_2010-2015 y, finalmente, Tca\_1975-2015 que fueron analizadas en esta investigación.

Ahora bien, nuestros resultados parecen converger y explicar que el fenómeno de crecimiento urbano ha tenido y tiene un efecto negativo sobre la problemática de recarga, abatimiento y disponibilidad del manto acuífero, como lo sostiene McDonald *et al.* (2011b) en su estudio. Esto es, posiblemente, atribuido a los cambios de usos de suelo y, por otro lado, al desarrollo industrial como principal catalizador de migración hacia la ciudad, derivado de la creciente necesidad de mano de obra que ha demandado la

industria maquiladora de exportación y que se puede asociar a una mayor cantidad de recursos naturales demandados para su sobrevivencia y operación.

## Conclusiones

Del análisis del comportamiento del crecimiento urbano en función de los usos de suelo, se concluye que, de los usos, los habitacionales son los que mayor recurso agua demandan. Sin embargo, se infiere que están estrechamente vinculados con los usos industriales y de servicios. Esto da un claro panorama de los efectos negativos que se podrían generar en el futuro, debido a la ausencia de una planeación integral urbana y políticas públicas de desarrollo adecuadas (Swynghedouw, 1995), al basar el desarrollo económico en la industrialización (maquilización) altamente consumidora de agua y no en la capacidad de carga del medio natural hídrico subterráneo que podría poner en riesgo la estabilidad urbana, como lo sostiene Díaz *et al.* (2014).

Por otra parte, si se toma en cuenta que la planeación no soportada en el análisis del territorio como referencia se traduce en una proporción mínima de área resultante en cuanto al uso urbano destinado para pozos de infiltración, con apenas el 0.19% del suelo, que pudieran coadyuvar en el control de avenidas fluviales y, en consecuencia, sobre la posible recarga, como paliativo hacia el acuífero subterráneo, habla de la ausencia de políticas urbanas adecuadas que permitan mitigar los impactos sobre el medio natural, ya que la discrepancia en porcentajes de área habitacional y la destinada para este efecto es de 45.19%; es decir, es prácticamente nula. Esto último es insostenible e inexplicable, sobre todo si se consensó lo que McDonald *et al.* (2011a) plantea en su investigación acerca de las principales estrategias implementadas en las ciudades, además de los retos que enfrentarán para hacer frente y cubrir las necesidades de insuficiencia hídrica por efectos del crecimiento urbano (McDonald *et al.*, 2011b).

Ciudad Juárez presenta ventajas para la producción industrial respecto a otras ciudades del interior del país. Estas ventajas han servido de acicate a la ocupación urbana del territorio fronterizo, detonando dinámicas de ocupación espacial que, si bien generan riqueza y competitividad, socavan la base física que soporta el ecosistema urbano. El crecimiento de la actividad industrial trajo aparejado la llegada de migrantes, el incremento de los usos del suelo habitacional, la impermeabilización de posibles áreas de recarga y demás factores que, a la larga, modificaron el balance hídrico local, por lo que los balances que se hacen del beneficio económico generado por la industria maquiladora deberán considerar en su contabilidad de costos el impacto hidrológico asociado al crecimiento industrial desordenado de la ciudad. Los datos generados en esta tesis abonan a la idea de que dicho crecimiento no ha sido sustentable.

En dicho contexto, surgen cuestionamientos vitales para el futuro de Ciudad Juárez ante la incertidumbre de quedarnos sin agua ¿se pueden seguir atrayendo inversiones a la ciudad? ¿ante la explotación del acuífero subterráneo no sustentable, por cuanto tiempo más seguirá siendo competitiva Ciudad Juárez? ¿las políticas federales, estatales y municipales en materia de crecimiento económico fueron las adecuadas? ¿qué se está haciendo actualmente en materia de planeación y políticas urbanas para no convertirse en una ciudad como la ciudad del Cabo en Sudáfrica? (Mauck, 2018).

Lo antes descrito pudiera ser un claro indicador de que las actuales políticas de desarrollo urbano y crecimiento de Ciudad Juárez carecen de todo sentido de ciudad sustentable. Esto resulta importante y contradictorio si se toma como referencia que el banco interamericano de desarrollo actualmente aboga por ciudades con visión sustentable que cuide de los ya deteriorados recursos naturales, ya que esto podría ocasionar problemas importantes de salud, violencia y desigualdad social, que afectarían principalmente a

los más desprotegidos, dentro de los cuales prevalecen las mujeres y los niños, principalmente en las ciudades de América latina.

Los hallazgos de este trabajo obligan a replantear el esquema de desarrollo urbano que ha prevalecido en la ciudad durante los últimos 50 años. No es sustentable en el plazo inmediato y amenaza con ser menos sustentable si se siguen, por ejemplo, impermeabilizando frentes de montaña y otras áreas de recarga (Bowen, Hamada, & O'Connor, 2014). Los escenarios mencionados de incremento de temperatura y disminución de la precipitación (Conagua, 2011) pueden adquirir connotaciones críticas al combinar tendencias de un cambio climático a gran escala, con un modelo de desarrollo urbano a escala local que no incorpora la variabilidad climática como un factor limitante al crecimiento de la ciudad. Los costos ya se perciben localmente, pero estos pueden agravarse si se carece de visión de largo plazo por los tomadores de decisiones. Estos deberán considerar factores adicionales a la disponibilidad de suelo y vecindad de la frontera, pues dichos factores no bastan para garantizar un metabolismo urbano que garantice la existencia de la ciudad en el largo plazo.

Y en esta línea se inscriben los aportes más relevantes del trabajo aquí presentado. Se demuestra con hechos, cifras y datos que una ciudad fronteriza, emblemática de muchas otras situadas en el norte árido de México, está obligada a incorporar criterios novedosos de sustentabilidad en la planeación de los nuevos espacios urbanos que seguramente surgirán en el futuro. De estos depende que Ciudad Juárez persista como lo que ha sido hasta ahora, uno de los puntos de intercambio comercial, económico y cultural más vigorosos de la frontera norte de México desde hace al menos un siglo.

## Agradecimientos

Agradezco al CONACYT y a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) por su apoyo y patrocinio para la realización de esta tesis doctoral: "Análisis del crecimiento urbano de ciudad Juárez, Chihuahua, México: repercusiones sobre la demanda y disponibilidad hídrica, y abatimiento del acuífero." de la cual se deriva el presente manuscrito. A todos los miembros del Cuerpo Académico Geoinformática Aplicada a Procesos Geoambientales (UACJ-CA-094). This material is supported by the National Institute of Food and Agriculture, U.S. Department of Agriculture, under award number 2015-68007-23130.

## Referencias

- Alatorre, L. C., Díaz, R. E., Miramontes, S., Bravo, L. C., & Sánchez, E. (2014). Spatial and Temporal Evolution of the Static Water Level of the Cuauhtemoc Aquifer during the Years 1973, 1991 and 2000: A Geographical Approach. *Journal of Geographic Information System*, 6(5), 572-584. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2014.65047>
- Al-Fugara, A., Al-Shabeeb, A., Al-Shawabkeh, Y., Al-Amoush, H., & Al-Adamat, R. (2018). Simulation and Prediction of Urban Spatial Expansion in Highly Vibrant Cities Using the Sleuth Model: A Case Study of Amman Metropolitan, Jordan. *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, 13(1), 37-56.
- Alig, R. J., Kline, J. D., & Lichtenstein, M. (2004). Urbanization on the US landscape: looking ahead in the 21st century. *Landscape and Urban Planning*, 69(2-3), 219-234. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.07.004>
- Aristegui, C. A., & Pérez, G. M. E. (2014). Evolucion del sellado de suelos en Colmenar Viejo (Madrid) entre 1861 y 2011. *XVI Congreso de Tecnologías de la Información Geográfica*. Alicante. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10045/46400>
- Ayuntamiento de Juárez, & Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP). (2016). *PDUS. Plan de Desarrollo Urbano Sostenible*. Ciudad Juárez.



- Barraza, L., Acosta, D., Almada, M. H., Almada, M. M., Ampudia, R. L., Castillo, C., Castillo, L., Castillo, V. N., Martínez, T. W., & Velazquez, V. M. (2009). *Diagnóstico sobre la realidad social, económica y cultural de los entornos locales para el diseño de intervenciones en materia de prevención y erradicación de la violencia en la región norte: el caso de ciudad Juárez, chihuahua*. México.
- Bowen, E. E., Hamada, Y., & O'Connor, B. L. (2014). Mapping Mountain Front Recharge Areas in Arid Watersheds Based on a Digital Elevation Model and Land Cover Types. *Journal of Water Resource and Protection*, 2014, 6(8), 756-771. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.68072>
- Brizuela, A. B., Aguirre, C. A., & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para el análisis multitemporal. En: R. Rivas, A. Crisotto & M. Sacido (Eds.). *TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. (pp. 207-214). Argentina: Editorial Martín.
- Brockerhoff, M. P. (2000). An Urbanizing World. *Population Bulletin*, 55(3), 1-44.
- Cervera, L. E. (2007). Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Estudios Fronterizos*, 8(16), 9-41.
- Cervera, F. M., & Rangel, G. J. (2015). Distribución de la Población por Tamaño de Localidad y su Relación con el Medio Ambiente. *Seminario-taller "Información para la toma de decisiones: Población y Medio Ambiente"*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Chávez, F. J. (14 de Julio de 2013). Sufren escasez de agua en varias colonias. *El Diario mx*.
- Chen, S., & Chen, B. (2015). Sustainable Urban Metabolism. En: S. E. Jorgensen (Ed.). *Encyclopedia of Environmental Management*. (pp. 1-9). Boca Ratón: CRC Express.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección*. Madrid: Ediciones RIALP.
- Cifuentes, R. P. A., & Llop, T. J. M. (2015). Rethinking the city: sustainable urban development strategies of intermediate Latin American cities. *Revista Nodo*, 10(19), 73-83.
- Comisión Nacional del Agua. (2005). *Estadísticas del agua en México*. México: Comisión Nacional del Agua.
- Comisión Nacional del Agua. (2011). *Atlas del Agua en Mexico 2011*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2014). *Estadísticas del Agua en México*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 26 de enero de 2016, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>
- Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas y Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Juárez (0833), Estado de Chihuahua*.
- Dhar, A., Sahoo, S., Dey, S., & Sahoo, M. (2014). Evaluation of Recharge and Groundwater Dynamics of a Shallow Alluvial Aquifer in Central Ganga Basin, Kanpur (India). *Natural Resources Research*, 23(4), 409-422. doi: <https://doi.org/10.1007/s11053-014-9251-y>
- Díaz, C. R. E., Bravo, P. L. C., Alatorre, C. L. C., & Sánchez, F. E. (2014). Análisis geoespacial de la interacción entre el uso de suelo y de agua en el área peri-urbana de Cuauhtémoc, Chihuahua. Un estudio socioambiental en el norte de México. *Investigaciones Geográficas*, 83, 117-131. doi: <https://doi.org/10.14350/ig.32694>
- Eastman, J. R. (2004). *IDRISI Kilimanjaro, Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Clark Worcester, MA: Clark University.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (1996). Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Number 130, 152 pp. Roma.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2011). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo*. Madrid: Mundi-Prensa. Recuperado el 18/10/2019 de <http://www.fao.org/3/a-i1688s.pdf>
- García-Almirall, P., Valls, F., & Moix, M. (2011). *SIG en la Gestión de la Información Urbanística en el ámbito local*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Glaeser, E. L., & Kahn, M. E. (2003). *Sprawl and Urban Growth*. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research.

- González, I. (20 de Junio de 2017). *Sufren también por falta de agua en el km 30*.
- Hasse, J. E., & Lathrop, R. G. (2003). Land resource impact indicators of urban sprawl. *Applied Geography*, 23(2-3), 159-175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2003.08.002>
- Herrera, I. I. R., Orozco, E., & Mujica, C. A. (2011). Strategy for the use of the hydric resource underground in semi-arid area of Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(3), 12-18.
- Heywood, C. E., & Yager, R. M. (2003). *Simulated Ground-Water Flow in the Hueco Bolson, an Alluvial-Basin Aquifer System near El Paso Texas*. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4108.
- Howard, K., & Gerber, R. (2018). Impacts of urban areas and urban growth on groundwater in the Great Lakes Basin of North America. *Journal of Great Lakes Research*, 4(1), 1-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.11.012>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *Anuario Estadístico y Geográfico de Chihuahua 2015*. México: INEGI.
- Jantz, C. A., Goetz, S. J., & Shelley, M. K. (2004). Using the Sleuth urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore-Washington metropolitan area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(2), 251-271. doi: <https://doi.org/10.1068/b2983>
- Johnson, M. P. (2001). Environmental Impacts of Urban Sprawl: A Survey of the Literature and Proposed Research Agenda. *SAGE Journals*, 33(4), 717-735. doi: <https://doi.org/10.1068/a3327>
- Lilliefors, H. W. (1967). On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown. *Journal of the American Statistical Association*, 62(318), 399-402.
- López-Álvarez, B., Ramos-Leal, J. A., Carbajal, N., Hernandez-García, G., Moran-Ramírez, J., & Santacruz-DeLeón, G. (2014). Modeling of Groundwater Flow and Water Use for San Luis Potosí Valley Aquifer System. *Journal of Geography and Geology*, 6(3), 147-161. doi: <http://dx.doi.org/10.5539/jgg.v6n3p147>
- Márquez, B. Y. (2008). *Análisis y Simulación del Crecimiento Urbano Utilizando Sistemas de Información Geográficos: Ciudad Juárez, Chihuahua* (Tesis de Maestría en Economía Aplicada). El Colegio de la Frontera Norte, A.C. Ciudad Juárez, Chihuahua.
- Mauck, B. A. (2018). *The capacity of the Cape Flats aquifer and its role in water sensitive urban design in Cape Town*. (Tesis de Doctorado en Filosofía). University of Cape Town. South Africa.
- McDonald, R. I., Green, P., Balk, D., Fekete, B. M., Revenga, C., Todd, M., & Montgomery, M. (2011a). Urban growth, climate change, and freshwater availability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(15). doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1011615108>
- McDonald, R. I., Douglas, I., Revenga, C., Hale, R., Grimm, N., Grönwall, J., & Fekete, B. (2011b). Global Urban Growth and the Geography of Water Availability, Quality, and Delivery. *AMBIO*, 40(5), 437- 446. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0152-6>
- Mendoza, J. A. (Mayo-Agosto de 2006). Problemática del Agua y Crecimiento Urbano en Ciudad Juarez, Chihuahua. *Culcyt/Agua*, 3(14-15), 5-18.
- Mondragón, M. A. (2014). Uso de la Correlación de Spearman en un Estudio de Intervención en Fisioterapia. *Movimiento Científico*, 8(1), 98-104.
- Newman, P. W. (1999). Sustainability and Cities: Extending the Metabolism Model. *Landscape and Urban Planning*, 44(4), 219-226. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(99\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(99)00009-2)
- Ojeda de la Cruz, A., Narvaez-Tijerina, B., & Quintana-Pacheco, J. (2014). Gestion del agua doméstica urbana en Hermosillo (Sonora, México). Cuadernos de Geografía: *Revista Colombiana de Geografía*, 23(1), 147-164. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v23n1.41089>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2010). *El agua en un mundo en constante cambio: El 3er Informe Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo*.
- Palá, V., & Pons, X. (1996). Incorporation of relief in polynomial-based geometric corrections. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(7), 935-944.
- Patra, S., Sahoo, S., Mishra, P., & Mahapatra, S. C. (2018). Impacts of urbanization on land use /cover changes and its probable implications on local climate and groundwater level. *Journal of Urban Management*, 7(2), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2018.04.006>

- Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWAP). (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo*. París: UNESCO.
- Rascón, E., & Moreno, G. A. (1998). *Modelo Matemático de Simulación Hidrodinámica del Acuífero de la Zona Urbana de Cd. Juárez, Chih.* Junta Municipal de Aguas y Saneamiento, Dirección de Saneamiento, Departamento de Geohidrología. Cd.Juarez.
- Ros, M. D., Jiménez, V. P., & Silvente, M. M<. J. (2016). Actividad formativa: Análisis de crecimiento urbano. En: M. T. Tortosa, S. Grau, & J. D. Álvarez (Coords.). *XIV Jornadas de Redes de Investigación en Docencia Universitaria. Investigación, innovación y enseñanza universitaria: enfoques pluridisciplinarios*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Sánchez, É., Granados, A., Chávez, J., Martínez, M. I., & Terrazas, R. C. (2011). *Crecimiento urbano y configuración del paisaje en Ciudad Juárez, Chihuahua: Evaluación de los cambios en el uso y cobertura del suelo y su relación con la dinámica espacio-temporal del paisaje en la zona de expansión urbana de Ciudad Juárez, Chihuahua*. Ciudad Juárez: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). *Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2013 - 2018. Resumen Ejecutivo*. México. 2013.
- Shrestha, A., Roth, D., & Joshi, D. (2018). Flows of change: dynamic water rights and water access in peri-urban Kathmandu. *Ecology and Society*, 23(2), 1-13. doi: <https://doi.org/10.5751/ES-10085-230242>
- Sisto, N. P. (2011). Disponibilidad de agua, crecimiento urbano y agricultura de riego en la cuenca del río San Juan. *Gaceta de Economía*, 16, 277-294.
- Swyngedouw, E. A. (1995). The Contradictions of Urban Water Provision: A Study of Guayaquil, Ecuador. *Third World Planning Review*, 17(4), 387-405.
- Taylor, L. D. (11 de Noviembre de 2003). *Los orígenes de la industria maquiladora en México*.
- Tobler, W. R. (1970). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46, 234-240. doi: <https://doi.org/10.2307/143141>
- United Nations. (2008). *World Urbanization Prospects The 2007 Revision: Highlights*. New York.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga, S. R., Alcántara, P. C., Castor, R., Fernández, T., Bocco, G., & Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 62, 21-37.
- Watson, R. T., Noble, I. R., Bolin, B., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J., & Dokken, D. J. (2000). *Special Report on Land Use, Land-use Change and Forestry*. Cambridge: Cambridge University Press.