

Modelo espacial para el análisis del servicio ecosistémico de infiltración en áreas verdes urbanas

Spatial model for the analysis of the ecosystem service of infiltration in urban green areas.

Miguel Martínez Tapia

Universidad Autónoma del Estado de México, México

mmartinez01@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-2561-213X>

Gustavo Álvarez Arteaga

Universidad Autónoma del Estado de México, México

galvareza@uaemex.mx

 <https://orcid.org/0000-0002-0260-3484>

Recepción: 01 Septiembre 2024
Aprobación: 09 Noviembre 2024



Acceso abierto diamante

Resumen

El objetivo del presente trabajo es formular un modelo espacial para el análisis del servicio ecosistémico de infiltración en áreas verdes urbanas, en particular para el Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila, ubicado en la ciudad de Toluca, México. La metodología estuvo basada en el análisis de la transformación urbana y cambio de uso de suelo, la recopilación de datos del entorno, así como el uso de SIG para el análisis espacial del servicio ecosistémico de infiltración. Resultados: se identificó que, a pesar del cambio de uso del suelo del área decretada en superficie en comodato, se incrementó la infiltración en el área verde, aportando a la recarga de agua al acuífero del valle de Toluca. La replicabilidad de este modelo en otros casos de estudios es susceptible siempre y cuando se ajuste a la información actual del uso del suelo y vegetación. Conclusiones: La formulación del modelo espacial para el análisis del servicio ecosistémico de infiltración en áreas verdes urbanas, permitió evaluar la infiltración anual mediante el cambio de uso de suelo que ha tenido el área decretada del parque. Este enfoque ha permitido comprender el beneficio que proporciona a la sociedad el servicio ecosistémico de infiltración a la Ciudad de Toluca.

Palabras clave: análisis espacial, cambio de uso de suelo, crecimiento urbano, modelo de infiltración, transformación urbana.

Abstract

The objective of this work is to formulate a spatial model for the analysis of the ecosystem service of infiltration in urban green areas, particularly for the Alameda Poniente San José de la Pila State Park, located in the city of Toluca, Mexico. The methodology was based on the analysis of urban transformation and land use change, the collection of environmental data, as well as the use of GIS for the spatial analysis of the ecosystem service of infiltration. Results: It was identified that, in spite of the change of land use of the area decreed as a commodatum surface, infiltration in the green area increased, contributing to the recharge of water to the aquifer of the Toluca Valley. The replicability of this model in other case studies is susceptible as long as it is adjusted to current land use and vegetation information. Conclusions: The formulation of the spatial model for the analysis of the ecosystem service of infiltration in urban green areas, allowed us to evaluate the annual infiltration through the change in land use that the decreed area of the park has

Notas de autor

mmartinez01@gmail.com

had. This approach has made it possible to understand the benefit that the ecosystem service of infiltration provides to society in the city of Toluca.

Keywords: Infiltration modelling, Land use change, Spatial analysis, Urban growth and Urban transformation.

Introducción

Las áreas verdes urbanas (AVU) desempeñan un papel crucial en el contexto ambiental, ya que ofrecen una amplia gama de servicios ecosistémicos, entre los que destacan la infiltración y recarga de acuíferos, la retención de agua, el incremento del aporte hídrico y la mejora en la captación de agua pluvial (Sorensen et al., 1998; Jenerette et al., 2011; NTEA-019-SeMAGEM-DS-2017). Estas áreas, que incluyen diversas formas y estructuras de vegetación, contribuyen significativamente al bienestar de la ciudadanía, a la mejora de la calidad de vida urbana, además de ser esenciales para la sostenibilidad urbana (Pérez-Medina y López-Falfán, 2015; Chen et al., 2022; NOM-001-SEDATU-2021, 2022).

Los servicios ecosistémicos (SE) han sido definidos por Constanza (1997) y De Groot (2010) como "Las contribuciones directas o indirectas de los ecosistemas al bienestar humano". En México, la NOM-001-SEDATU-2021 los describe como " Aquellos beneficios tangibles e intangibles generados por los ecosistemas, indispensables tanto para la supervivencia del sistema natural y biológico como para el bienestar humano". Los SE aportan beneficios significativos a la sociedad (Gómez-Baggethun y Groot, 2007; Sofia et al., 2012), como el impacto positivo en la economía, la salud humana (Barzev, 2002; Twohig-Bennett y Jones, 2018), las relaciones sociales y la seguridad (MEA, 2005).

Por otra parte, Hutton y Leader-Williams (2003) señalaron que la vegetación que cubre estos espacios desempeña un papel esencial en la regulación del ciclo del agua, y que su alteración tiene impactos tanto cualitativos como cuantitativos sobre este recurso, además de afectar su dinámica espaciotemporal. Diversas investigaciones, como las de Evans et al. (2022), han evaluado el papel de la cubierta vegetal sobre los SE de las áreas verdes urbanas (AVU), destacando su capacidad para proporcionar servicios de regulación esenciales para la sostenibilidad y la resiliencia de los entornos urbanos.

El crecimiento de las áreas urbanas y el aumento de la densidad poblacional han impactado significativamente la estructura de los espacios verdes urbanos (Nor et al., 2017). Las AVU están cada vez más presionadas por el proceso de urbanización, lo que afecta negativamente los servicios ecosistémicos debido a la pérdida de terreno. Esta pérdida es consecuencia de la creciente demanda de infraestructura para brindar servicios públicos y de las intervenciones urbanas impulsadas por los proyectos y programas diseñados por las autoridades locales (Tian et al., 2011).

Por su parte, Eigenbrod et al. (2011) mencionan que la urbanización ejerce una presión sobre los ecosistemas urbanos, por lo que es probable que la alteración en el uso del suelo sea un factor de cambio relevante en la distribución de los SE antes de 2050. La capacidad que tiene un solo espacio verde para prestar diversos SE, enfrenta a la actual paradoja urbana, en la que la creciente demanda de infraestructuras grises y la disminución de la superficie verde se contraponen a la necesidad por proveer este tipo de servicios (Landscape Institute, 2009; Pinho et al., 2016).

El decremento y deterioro de las AVU provocan profundos cambios en los procesos naturales del medio ambiente (Grimm et al., 2008) y puede dar lugar a una disminución de los SE, es decir, de los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment-EMA, 2005). Si bien los procesos de urbanización han tenido beneficios, como la generación de viviendas, empleos y crecimiento económico de corto plazo, al ser desordenados, no han transformado la dinámica económica de las ciudades hacia un desarrollo sostenible, generando con ello externalidades negativas, como son la pérdida de SE (Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México-IDTP, 2013).

Pascual Trillo (2007), indica que los principales impactos previsibles del uso público del espacio urbano se pueden ordenar en dos tipos: a) Impactos producidos por las obras, instalaciones o equipamientos de uso público; y b) Impactos producidos por los visitantes. Los SE pueden ser considerados como un instrumento de desarrollo urbano de una ciudad en los procesos de planeación y diseño de los proyectos de las AVU.

El enfoque de desarrollo urbano basado en los SE ofrece una forma eficaz de apoyar la planificación de las AVU mediante la generación de cartografía. Este enfoque permite evaluar y cartografiar los SE dentro de la ciudad, mostrando las características de distribución espacial e identificar las posibles áreas de provisión de SE, mediante el análisis espacial de la sobreposición de los mapas de evaluación de los ecosistemas (Zhang y Muñoz Ramírez, 2019).

Vázquez Rodríguez (2018), menciona que el acelerado desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los ha convertido en una herramienta de trabajo para el análisis espacial y resolución de diversos problemas. Buzai (2012), menciona han generado una revolución intelectual centrada en el espacio geográfico basada en cinco conceptos de naturaleza espacial: localización, distribución, asociación, interacción y evolución espacial; pueden ayudar a visualizar los patrones espaciales y temporales de los servicios de los ecosistemas (Nemec y Raudsepp-Hearne, 2013). La información y los datos sobre los servicios ecosistémicos pueden analizarse e integrarse en los programas de SIG y representarse mediante la cartografía temática (Burkhard et al., 2013). La cartografía, de los SE es una herramienta importante para los responsables políticos y tomadores de decisiones sobre áreas de oferta, la demanda y el flujo de los servicios de los ecosistemas, (Geijzendorffer et al., 2015; Burkhard y Maes, 2017). La cartografía de los servicios ecosistémicos está generando un interés creciente en la planificación urbana, pero su aplicación en la toma de decisiones sigue siendo limitada (Baró et al., 2016).

Sin embargo, al revisar estas contribuciones que han sido abordadas con relación al crecimiento urbano, existen limitados estudios que aborden la relación de la transformación urbana y los servicios ecosistémicos de regulación de infiltración. Tal es el caso del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila (PEAPSJP), que se localiza en la delegación de San Buenaventura en el municipio de Toluca, Estado de México, entre las coordenadas extremas 19.266239 LN -99.709522 LW y 19.281308 LN -99.687363 LW, a una altitud de 2700 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Por ello el objetivo de la investigación consistió en formular un modelo espacial para el análisis del servicio ecosistémico de infiltración en áreas verdes urbanas, en particular para el caso de estudio del PEAPSJP, ubicado en la ciudad de Toluca, México. Como metodología, se diseñó el modelo de análisis considerando la transformación urbana y cambio de uso de suelo en el parque, la recopilación de datos del entorno, así como el uso de Sisma de Información Geográfica para el análisis espacial del servicio ecosistémico de infiltración en el caso de estudio.

Área de estudio

El PEAPSJP, se ubica en la delegación de San Buenaventura en el municipio de Toluca, Estado de México, entre las coordenadas extremas 19.266239 LN -99.709522 LW y 19.281308 LN -99.687363 LW, a una altitud de 2700 metros sobre el nivel del mar. Con base a la estimación de la superficie en el programa QGIS versión 3.28.4-Firenze, el área decretada cuenta con una extensión de 177.81 hectáreas, limita al norte con la Delegación Adolfo López Mateos, al este con la Delegación San Buenaventura, al sur con la Delegación San Buenaventura y San Antonio Buenavista, al oeste con el municipio de Zinacantepec (Figura I) (Ayuntamiento de Toluca 2006-2009).

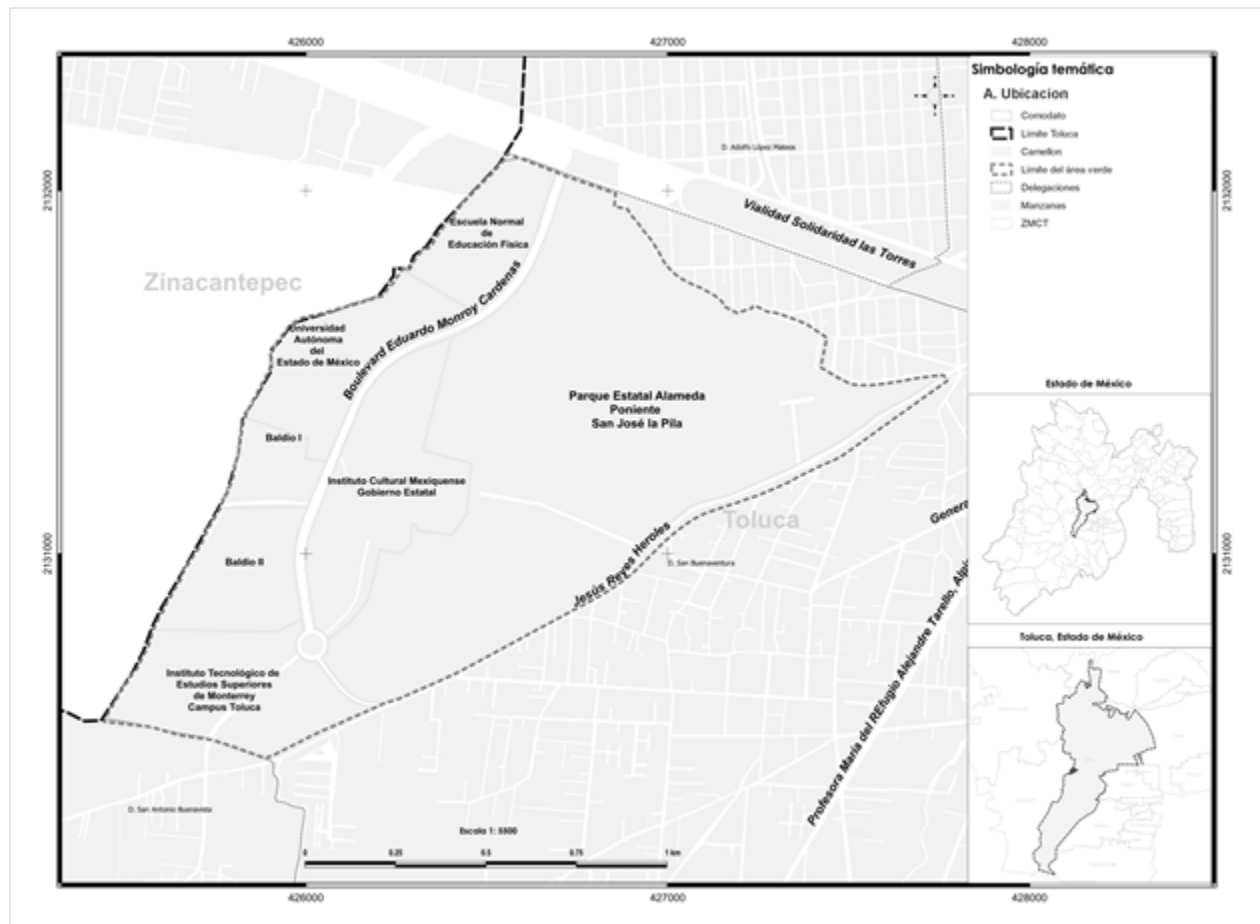


Figura 1.
Área de estudio

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos geográficos de la CONABIO. Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020; Ayuntamiento de Toluca 2006-2009. Programa de conservación y manejo del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila; INEGI. SCINCE. 2020

Metodología

Para realizar la evaluación del servicio ecosistémico de regulación de la infiltración del PEAPSJP, el esquema metodológico constó de tres fases (Figura 2). En la primera se determinó el grado de transformación urbana y cambio de uso de suelo en el parque, en la segunda, se recopilaron datos del entorno y por último se efectuó el análisis espacial del servicio ecosistémico de infiltración.

Transformación urbana y cambio de uso de suelo en el parque

En esta fase se recopiló y sistematizó la información cartográfica en el área decretada y la zona de la influencia con base a la escala de servicio de la NOM-001-SEDATU-2022, donde se consideraron los elementos de la naturaleza espacial de Buzai (2012), sobre el uso del suelo del área decretada y la zona urbana de la escala de servicio, mediante el geoprocésamiento de la información geográfica siguiente: a) Sobreposición e intersección de los datos en formato vectorial de la superficie urbana del periodo de 1976 - 2018, de las cartas topográficas de INEGI a escala 1:50000 y 1:20000, para evaluar la transformación urbana. b) La digitalización sobre la imagen de satélite del Google Earth disponible en el programa de QGIS (Versión 3.28 Firenze), de la superficie ocupada por los espacios desincorporados del parque para usos culturales y educativos. c) La

zonificación del uso del suelo y vegetación que presenta el área decretada para el año 2023, para determinar las asociaciones vegetales e infraestructura mediante la digitalización (Figura 2).

Recopilación de datos del entorno

Se realizó con la finalidad de obtener la zonificación del AVU, mediante el apoyo del estudio cualitativo apoyado mediante la observación directa para comprender el contexto (Enríquez Pérez, D. C., et.al., 2024, Gomez Benitez et. al., 2022), donde se identificaron las especies arbóreas de cada asociación vegetal, así como su estructura, áreas de reforestación, infraestructura de las áreas recreativas, zonas de relajación, de ejercicio, de juegos infantiles, canchas deportivas de futbol, basquetbol y americano, áreas de convivencia de los visitantes, los caminos, los senderos para ciclistas, peatones y áreas de servicio que presenta el área actual del PEAPSJP (Figura 2).

Análisis espacial del servicio ecosistémico de infiltración

Con base a la zonificación del uso de suelo y vegetación del AVU del año de 1982 y 2023, se generó el modelo espacial del servicio ecosistémico de regulación de infiltración (SERI), mediante el geoprocésamiento de la información geográfica de la textura del suelo, uso de suelo y vegetación, precipitación y temperatura media anual. El cálculo del SERI, se realizó a través del método indirecto de los números de escurrimiento que se describe en la NOM-011-CNA-2015, en donde se emplean ecuaciones y relaciones numéricas que vinculan las variables fisiográficas y climatológicas mencionadas. Esta información es elemental para el cálculo de los balances hidrológicos. Los factores que afectan el proceso de infiltración son: el tipo y textura del suelo, uso del suelo y la cobertura vegetal (Figura 2).

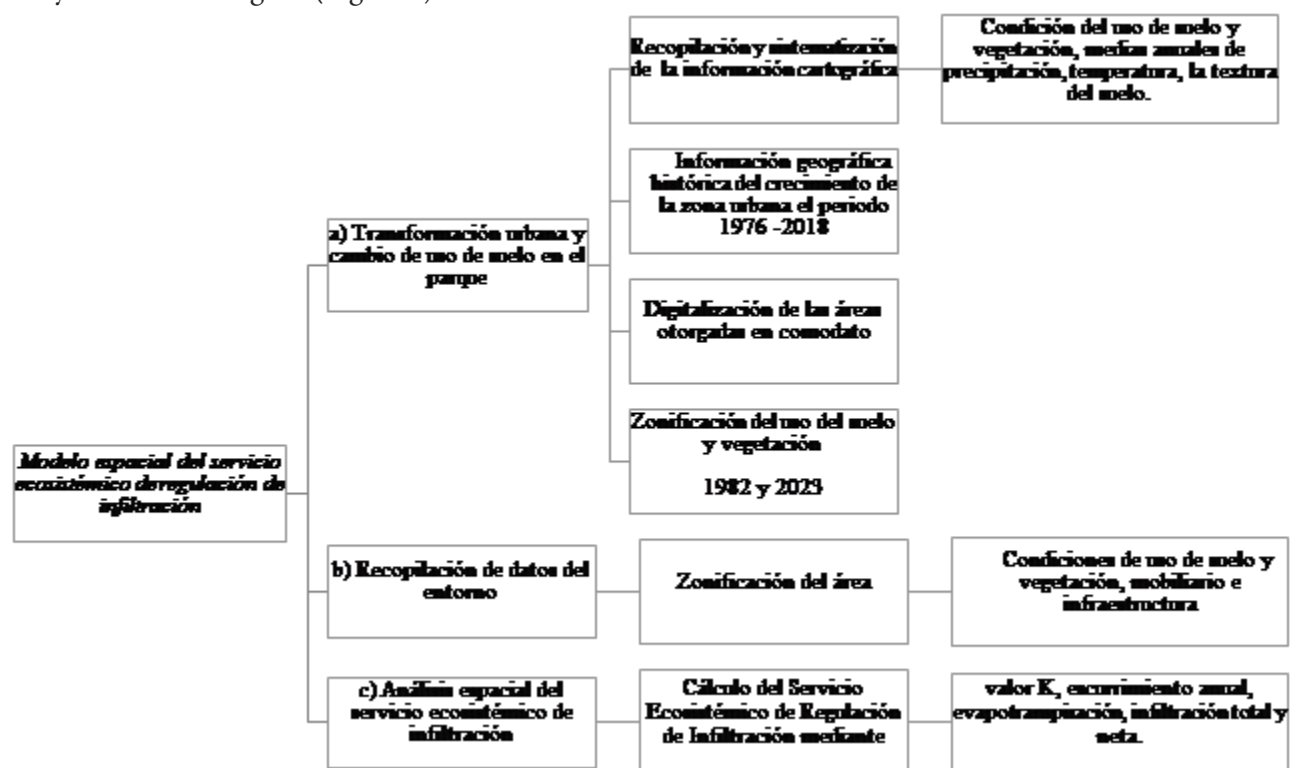


Figura 2.

Esquema metodológico del modelo espacial del servicio ecosistémico de regulación de infiltración

Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar la infiltración del agua en el AVU, es necesario conocer los componentes del ciclo hidrológico del agua: 1) Escorrentía, 2) Evapo-transpiración, 3), Interceptación e 4) Infiltración.

Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento está en función del uso de suelo, el tipo de textura y del volumen de precipitación anual, en México el INEGI, clasifica en tres tipos la textura del suelo (Tabla 3): A, que corresponde a suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos; el tipo B, para suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos, y el tipo C, son suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas. Al relacionar el uso del suelo y vegetación con el tipo de textura del suelo, se determinan los valores de K.

Tabla 3.

Valores de k, en función del tipo y uso de suelo

Uso del suelo	Tipo de textura del suelo		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos:			
En Hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75% - Regular -	0.20	0.24	0.30
Menos del 50% - Excesivo -	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

Fuente: elaboración propia con base a la Nom-011-CONAGUA- 2015.

Al determinar el valor de K, con base al uso de suelo, la cobertura vegetal y el tipo de textura de suelo, se determina el coeficiente de escurrimiento anual (C_e), mediante las fórmulas siguientes:

K: parámetro que depende del tipo y uso de suelo	Coefficiente de escurrimiento anual (ce)
Si K resulta menor o igual que 0.15	$Ce = K (P-250) / 2000$
Si K es mayor que 0.15	$Ce = K (P-250) / 2000 + (K-0.15) / 1.5$

Donde:

Ce: Coeficiente de escurrimiento anual

K: es un parámetro que depende del uso del suelo, cubierta vegetal, y textura del suelo conforme a los valores de la Tabla 3 de valores de k,

P: es la precipitación anual, expresada en mm.

El valor del parámetro fluctúa entre 0.07 y 0.33 y, en caso de valer menos de 0.15, se elimina el segundo término de la ecuación.

Infiltración Neta Anual

La infiltración neta anual puede estimarse a partir de los resultados del coeficiente de escurrimiento. De acuerdo con las ecuaciones generales aplicadas a los balances hídricos superficiales, la infiltración total puede estimarse como:

$$I_T = P_a - Q_a = (1 - Ce) \cdot P_a$$

Donde:

Pa: precipitación media anual.

Ce: coeficiente de escurrimiento.

Infiltración neta

Al tomar en cuenta la evapotranspiración real ETr, la infiltración neta puede calcularse mediante:

$$I_{NETA} = I_T - ETr$$

expresión en la que ETr se calcula por medio de la fórmula de Turc. En caso de que la sustitución de valores asociados a determinado lugar conduzca a un resultado negativo, quiere decir realmente que la infiltración neta es nula en dicho lugar. La ecuación de la fórmula de Turc en Castany, (1975) está dada por:

$$ETr = \frac{P}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

Donde:

P = Precipitación media anual en mm/año

L = $300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3$

T = Temperatura media anual en C°. En caso de conocerse la variación mensual de la temperatura y la precipitación, T se sustituye por un valor ponderado en función de la lluvia mensual. El cálculo de T, se realiza por medio de la siguiente expresión:

$$T = 27.161 - 0.0053 \times \text{elev}$$

Donde

T: Temperatura

Elev = Elevación (Modelo digital de elevación)

Resultados

Transformación urbana y cambio de uso de suelo en el parque

Durante las décadas de 1960 y 1980, fue notable el dinamismo de algunas ciudades intermedias dentro del área de influencia de la Ciudad de México, tales como Puebla, Toluca, Querétaro y Cuernavaca. Entre 1980 y 1990, la ciudad de Toluca mostró una tasa de crecimiento similar a la población urbana nacional, sin embargo, su expansión dio lugar al acercamiento con la Zona Metropolitana del Valle de México (ONU-HABITAT Sedesol, 2011).

El proceso de urbanización de la ciudad de Toluca (Figura 3), está ligado por el crecimiento industrial, originado por el establecimiento del corredor industrial Toluca Lerma en la década de 1960, y el proceso de migración que generó el fenómeno perturbador de origen geológico del sismo de 1985. El municipio de Toluca en 1970 tenía una población total de 239,261 habitantes, en 1990 llegó a los 487,612 y para 2020 se tiene una población total de 910,608 habitantes (INEGI, 2020; COESPO, 2021;).

Sahagún Sánchez et al. (2020), mencionan que, ante la transformación de los parques urbanos por las presiones de urbanización, es urgente generar información sobre la aportación de estos espacios, en términos de los SE que brindan para apoyar la toma de decisiones públicas y privadas. Según Filipe Narciso (2017), las intervenciones en el espacio público por los gobiernos locales utilizan diversas estrategias e instrumentos de política pública para crear, regenerar, reconvertir y recalificar viejos espacios urbanos y/o producir nuevos. Los procesos de evaluación del medio ambiente pueden servir para tomar decisiones con mayor racionalidad, al disponer de toda la información y no sólo de la que provee el mercado (De Frutos y Esteban, 2009). La evaluación de los SE, no ha sido del todo reconocido, y en general la población y los actores políticos y privados no están sensibilizados al respecto de su importancia, lo que ha propiciado su deterioro y reducido los beneficios ambientales que proveen (Sahagún Sánchez et al., 2020).

El enfoque basado en los SE ofrece una forma eficaz de apoyar la planificación de las AVU, a través de su evaluación y cartografía dentro de la ciudad; de igual forma es factible identificar posibles áreas de provisión de servicios mediante la superposición de los mapas de evaluación de los ecosistemas (Zhang S. y Muñoz Ramírez F, 2019).

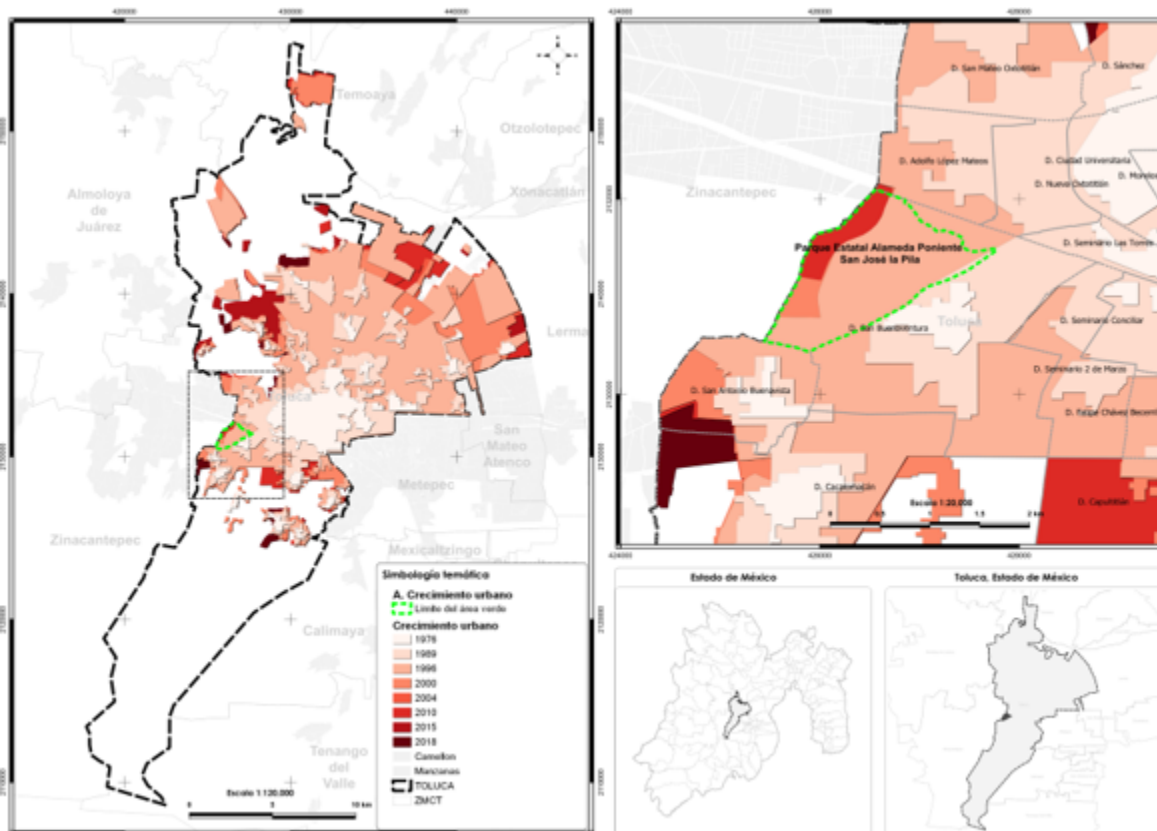
La expansión urbana en el territorio del municipio de Toluca originó la conversión de los terrenos agrícolas en la zona urbana, concentrando una alta densidad de población., en el AVU los contratos de comodato otorgados para la Escuela Normal de Educación. Para el caso específico del Parque, la desincorporación de los espacios otorgados en comodato a instituciones educativas y culturales, altero los patrones de las corrientes de agua superficial, redujo 81.54 hectáreas de la zona permeable del recurso agua en el territorio del AVU, dejando solo 96.28 hectáreas destinadas como área verde urbana (Tabla 4 y Figura 3).

Tabla 4.

Total, de superficie de las áreas del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila.

Zonas en comodato	Superficie (ha)
Escuela Normal de Educación Física	9.21
Instituto Cultural Mexiquense del Gobierno Estatal	18.95
Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey Campus Toluca	16.62
Universidad Autónoma del Estado de México	13.11
Baldío I	10.48
Baldío II	4.79
Carretera	5.16
Boulevard	3.22
Subtotal	81.54
Parque Estatal Alameda Poniente San José la Pila	96.28
Total	177.82

Fuente: elaboración propia.

**Figura 3.**

Transformación urbana de la ciudad de Toluca del periodo de 1976-2018

Fuente: elaboración propia con datos geográficos de la zona urbana de los años de 1976, 1989, 1996, 2000, 2004, 2010, 2015, 2018, de las cartas topográficas de INEGI a escala 1:50000 y 20000

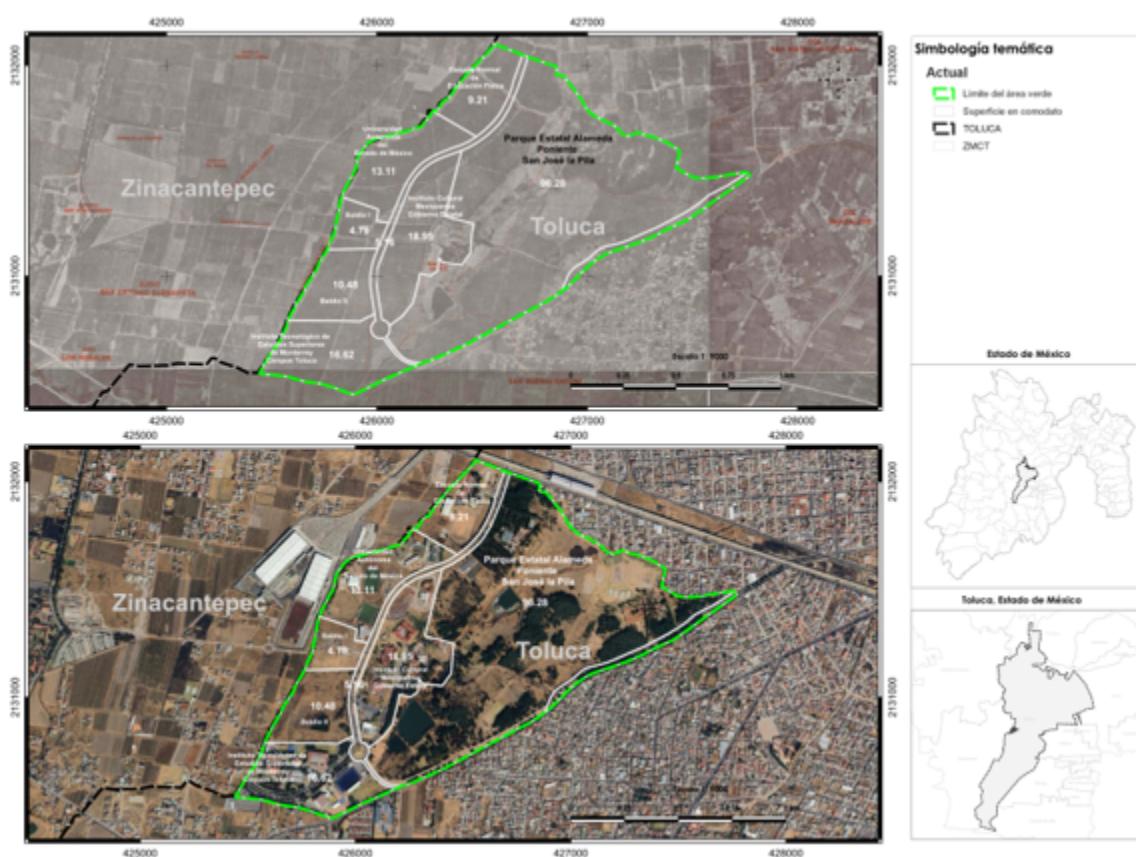


Figura 4.

Ubicación de la superficie desincorporada del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila

Fuente: elaboración propia con datos geográficos de la CONABIO. Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020; Ayuntamiento de Toluca 2006-2009. Programa de conservación y manejo del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila; INEGI. SCINCE. 2020; Recorrido virtual en el programa Google Earth. 2022; Comisión de conurbación del Centro País, Zona Metropolitana de Toluca. Fotomapa Escala 1:10000.

Recopilación de datos del entorno

El trabajo de campo permitió identificar infraestructura construida y en donde se realizan las diversas actividades recreativas, deportivas, de descanso, visitas y la cobertura vegetal como las que se describen a continuación:

- Camino que sirven de trotapista, ciclopista y senderos: la trotapista y ciclopista están cubiertas de arcilla lo que favorece la filtración y escurrimiento del agua, ayudando a la gestión del agua.
- Canchas de fútbol soccer cubiertas de pasto que facilitan la infiltración y protección del suelo, cabe resaltar que, por la práctica de la actividad, algunas zonas carecen de una cubierta de pasto.
- Canchas de basquetbol están cubiertas de cemento, afectando la infiltración del agua.
- Cancha de fútbol americano cubierta de pasto, lo cual mejora la infiltración, esta área solo es utilizada en cada evento deportivo de fútbol americano.
- Estacionamiento con cubierta de arcilla, facilita la filtración y escurrimiento del agua.
- Salón de usos múltiples construido para la convivencia de los visitantes.
- Teatro al aire libre, ofrece una vista completa del escenario, diseñado para eventos culturales y artísticos.
- Zonas de juegos infantiles cubierta de pasto y arcilla que facilita la infiltración,
- Zona de aparatos de gimnasio cubierta de pasto.

- j. Cuerpos de agua, uno sirve como biodigestor que mejora la calidad del agua de las descargas de uso doméstico y proporciona un hábitat para algunas aves migratorias.
- k. Palapas con asadores, contruidos para la convivencia de los visitantes para la preparación de alimentos y festejos familiares durante los fines de semana.
- l. Módulos sanitarios.
- m. Vivero, la producción de plántula está destinada para las reforestaciones que se realizan en el municipio de Toluca.
- n. Oficina administrativa
- o. Área comercial ambulante, esta área solo brinda el servicio los fines de semana en el área de los juegos infantiles.

Debido al uso del suelo agropecuario que presentó el área verde antes del decreto y las acciones de reforestación realizadas en el AVU, se identificó una cubierta vegetal de bosque urbano cerrado, bosque con vegetación secundaria, bosque con vegetación secundaria y herbácea, zonas de reforestación y pastizal. En el bosque urbano cerrado se encuentran las especies siguientes: a) cedro blanco (*Cupressus lindleyi*), b) pino (*Pinus* spp.) y c) eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*). El bosque con vegetación secundaria y herbácea está asociado en las áreas con especies de pino y eucalipto la vegetación herbácea, presentan malezas de hojas anchas en su mayoría de la familia Asteraceae, Commelinaceae, Lamiaceae, Fabaceae, piaceae,

El pastizal es el más abundante en el área verde está distribuida en zonas donde no hay una cubierta arbórea, tiene una altura de 20 a 50 centímetros, su coloración característica durante la temporada de sequía es amarillenta pálida, en la temporada de lluvia y de mayor humedad de color verde en el programa de manejo se reportan las especies *Cynodon* sp. *Baccharis decumbens* (Pasto ganadero) y *Dalea foliolosa* (Pasto ganadero).

Esta información se utilizó para evaluar la infiltración en el AVU mediante el Modelo espacial del servicio ecosistémico de regulación de infiltración y con base a la clasificación del espacio público como clase E-5 de acuerdo a la NOM-001-SEDATU-2022, se realizó la isócrona de la zona de influencia considerando una distancia de 12 kilómetros a partir del punto de acceso al área verde mediante el trazo vectorial de las vías de comunicación. Para conocer la población beneficiaria del AVU, se utilizó la información de la población total por manzana del censo de población y vivienda del 2020 del INEGI. Durante este análisis no se consideró el resultado del área de influencia por medio de la delimitación del geoprocesamiento del buffer, debido a que este método incrementa la población beneficiada (Figura 5).

Con base al análisis espacial se obtuvo la población beneficiada por municipio, así, por ejemplo, Toluca tiene una población beneficiada de 475,973 habitantes que representa el 66.3% de su población total, Zinacantepec con 141,138; Metepec con 82,103; Almoloya de Juárez con 17,039 por último Calimaya con 2145. En conjunto, los cinco municipios tienen una población total beneficiada con los servicios del parque de 718,398 habitantes.

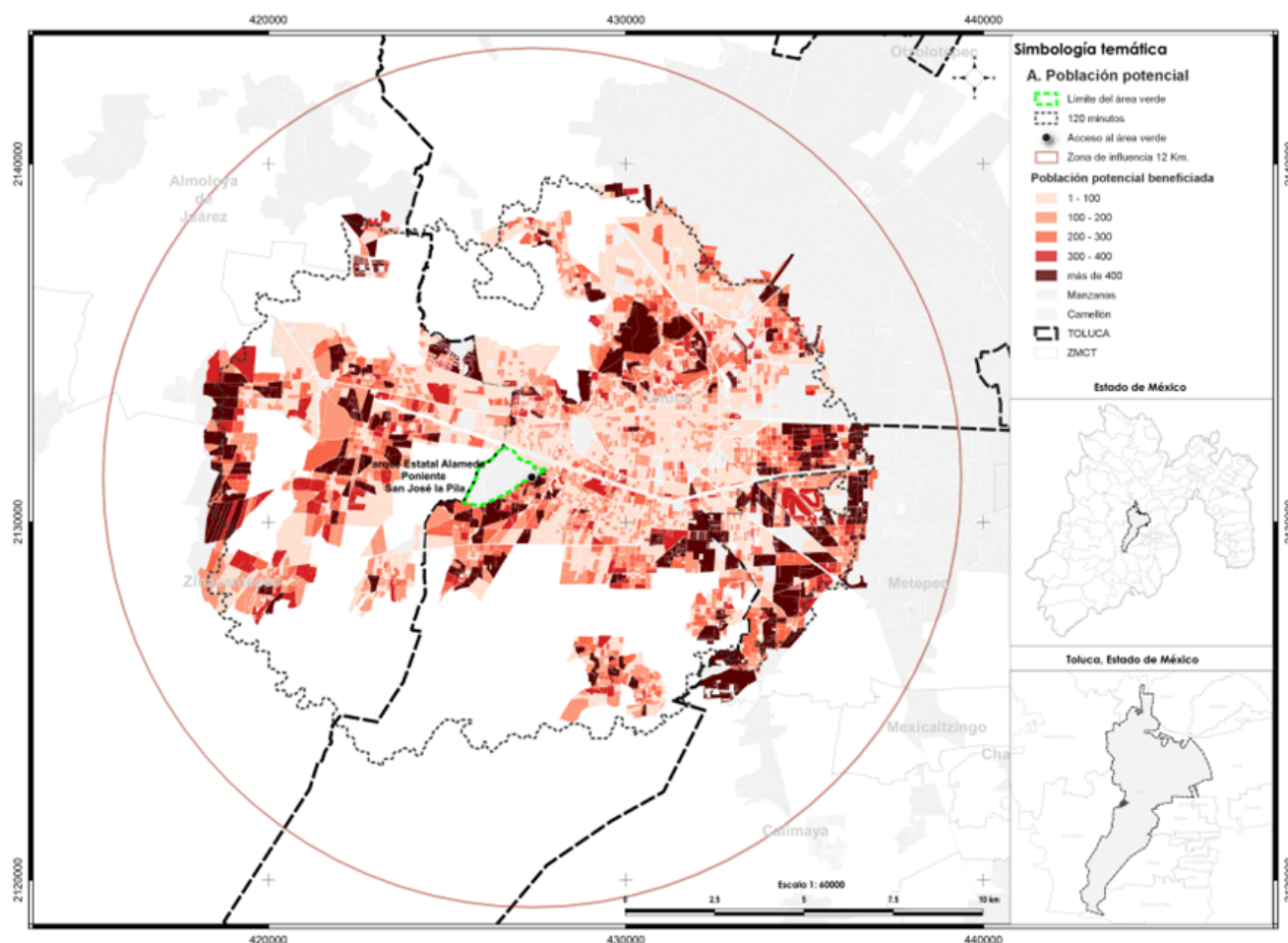


Figura 5.

Población potencial beneficiada del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila a nivel de manzana.
 Fuente: elaboración propia con datos geográficos de la CONABIO. Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020; Ayuntamiento de Toluca 2006-2009. Programa de conservación y manejo del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila; INEGI. SCINCE. 2020; NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEDATU-2022, Espacios públicos en los asentamientos humanos.

Análisis espacial del servicio ecosistémico de infiltración

Los factores que condicionan el proceso de infiltración son el tipo y textura del suelo, uso del suelo y la cobertura vegetal, por lo que es importante evaluar el beneficio del servicio ecosistémico de regulación de infiltración. El coeficiente del escurrimiento se determinó con base al factor K del área verde urbana mediante la información del uso de suelo y vegetación, la textura del suelo. Para el caso de estudio y considerando los valores de la NOM-011-CNA-2015 en la tabla 5, se muestran los valores asignados.

Tabla 5.

Factor K para el uso de suelo y cubierta vegetal para el año 2023.

Uso del suelo	Uso de suelo y vegetación del área verde urbana	Factor K
Cubierto más del 75%	Bosque Bosque capulín, sauce llorón, pino Bosque de álamo plateado, cedro blanco Bosque de cedro blanco Bosque de cedro blanco, eucalipto Bosque de cedro blanco, eucalipto, pino Bosque de eucalipto Bosque de eucalipto, cedro blanco Bosque de pino Bosque de pino, álamo plateado, cedro blanco Bosque de pino, cedro blanco Bosque de pino, cedro blanco, eucalipto, tejocote Bosque de pino, eucalipto, álamo Bosque de pino, eucalipto, alnus Bosque de sauce llorón Bosque eucalipto, pino, cedro blanco, tejocote	0.16
Más del 75% - Poco -	Pastizal	0.20
Cubierto del 25 al 50%	Bosque con vegetación secundaria y herbácea	0.26
Cubierto menos del 25%	Camellón Cancha de pasto Reforestación de pino Reforestación de pino, cedro blanco Reforestación de pino, eucalipto Reforestación de pino, fresno Vegetación Secundaria y Herbácea	0.28
Zonas urbanas	Área de asadores Banqueta Carretera Cemento Construcción Glorieta Mirador Monumento Oficina Pasillo cemento Sanitarios Teatro al aire libre	0.29
Camino	Camino Estacionamiento Pista Reactivación Física Sendero para ciclistas Sendero peatonal Zona de juegos Infantiles	0.30
	Cauce Cuerpo de agua Vegetación acuática	0

Elaboración propia

La variable de precipitación y temperatura se obtuvo de las estaciones meteorológicas mediante el siguiente geoprocesamiento: 1. Ubicación de las estaciones climatológicas en operación; 2. Análisis estadístico de la regresión lineal con los datos de la temperatura y altitud; 3. Se descartaron las estaciones climatológicas que no tuvieron influencia con la temperatura y altitud. 4. Interpolación con el método de spline de la precipitación y temperatura con un tamaño de píxel de 1 metro.

La infiltración del AVU depende de las variables de la textura del suelo, el uso del suelo, cobertura vegetal, temperatura, la precipitación, el coeficiente de escurrimiento, evapotranspiración (Figura 6).

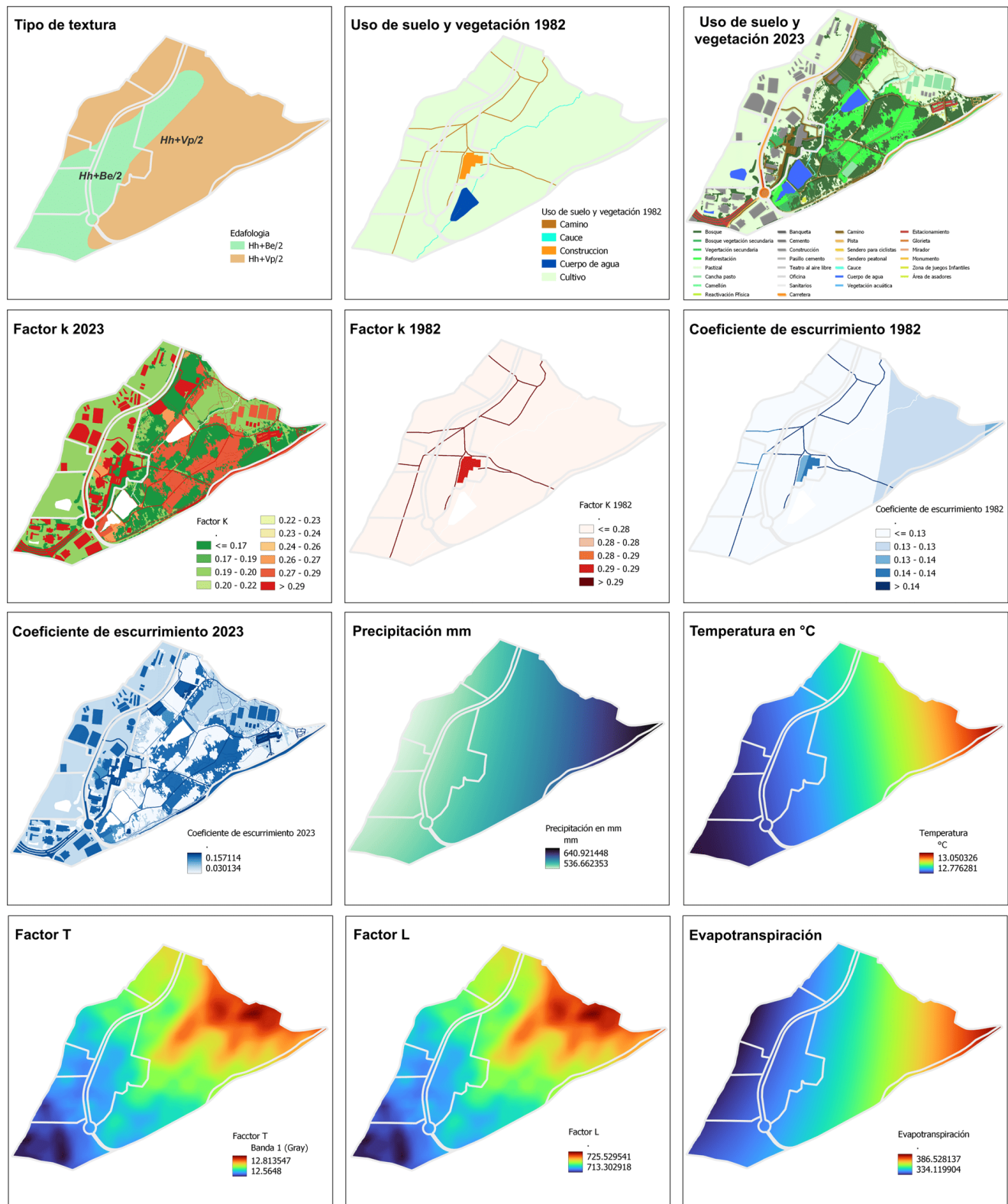


Figura 6.
Variables que condicionan la infiltración en el área verde urbana.

Fuente: elaboración propia con datos geográficos de la CONABIO. Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020; Ayuntamiento de Toluca 2006-2009. Programa de conservación y manejo del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila; INEGI. SCINCE. 2020; Recorrido virtual en el programa Google Earth. 2022, Trabajo de campo.

El manejo del uso del suelo y la gestión realizada mediante las reforestaciones desde el decretó como área verde urbana, permite delimitar las áreas de bosque consolidado, espacios verdes con pastizal y servicios de recreación del año de 1982 y 2023 y con base a las variables de la figura 5, se determinó la infiltración por metro cuadrado y volumen en metros cúbicos que se infiltran en el AVU (Figura 7 y Tabla 6.)

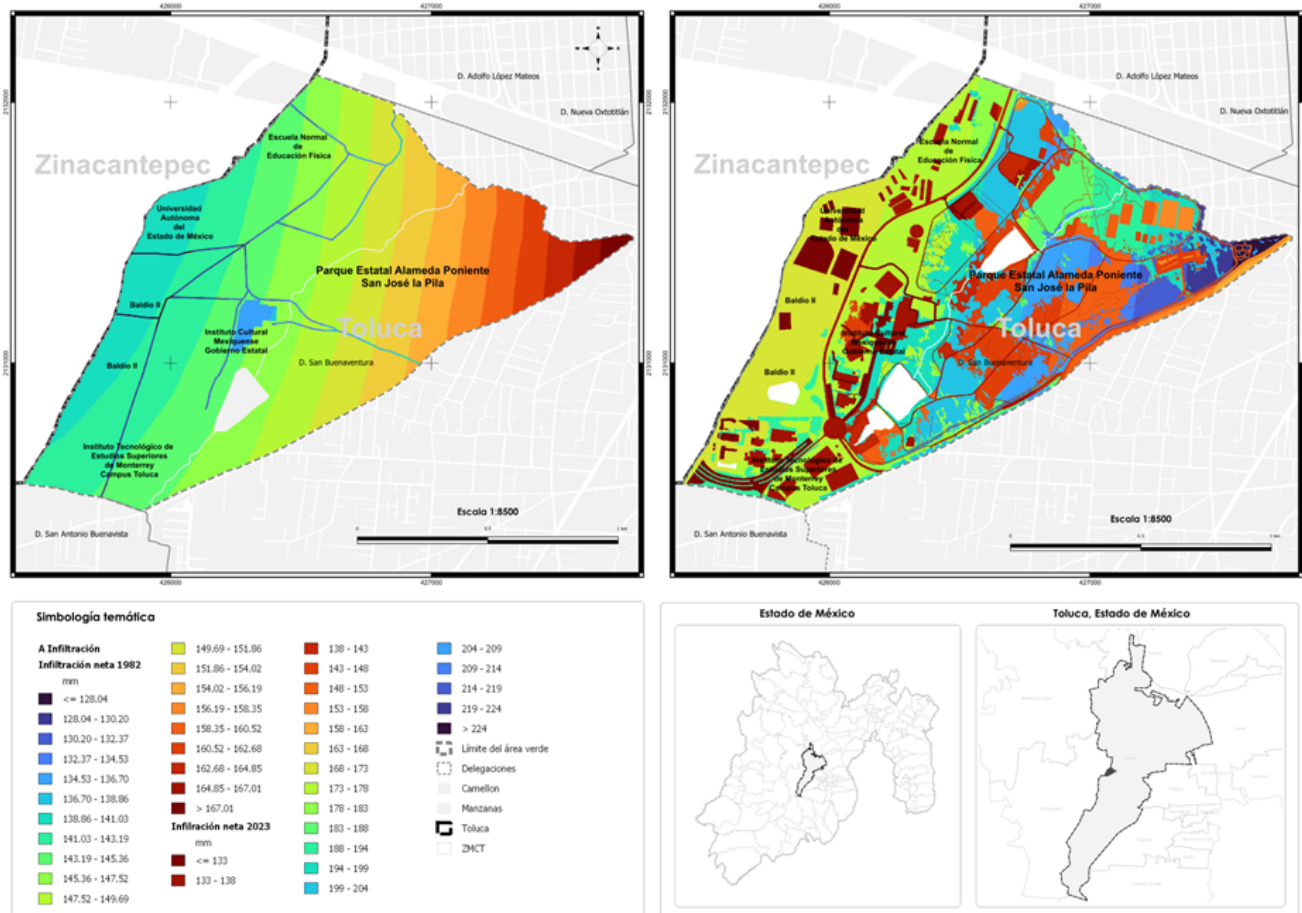


Figura 7

Infiltración Neta del área decretada del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila 1982 y 2023.

Fuente: elaboración propia con base al cálculo de la infiltración total, evapotranspiración y el escurrimiento superficial aplicando las ecuaciones de la NOM-011-CNA-2015.

Tabla 6.

Infiltración media en metros cúbicos del año 1982 y 2023 por área otorgada en comodato.

Zonas	Superficie (ha)	1982	2023
		Infiltración Media (m ³) *	
Baldío II	4.79	614.86 ±340.37 (55)	305.38 ±69.48 (23)
Baldío	10.48	466.33±430.36 (92)	1033.44 ±618.76 (60)
Universidad Autónoma del Estado de México	13.11	386.50±292.68 (76)	1,752.63 ±2220.22 (127)
Carretera	5.16	536.90±358.46 (67)	1,190.75±633.90 (53)
Escuela Normal de Educación Física	9.21	359.64 ±182.43 (51)	1520.42±1467.98 (97)
Boulevard	3.22	193.17 ±109.13 (56)	714.24±349.17 (49)
Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey Campus Toluca	16.62	816.78 ±776.49 (95)	3479.75±3,737.04 (107)
Instituto Cultural Mexiquense del Gobierno Estatal	18.95	1,048.50 ±650.45 (62)	5,322.38±4,460.01 (84)
Parque Estatal Alameda Poniente San José la Pila	96.28	985.03 ±1008.31 (102)	33,154.89±33,617.15 (101)
Total	177.82	5407.70	48,473.88

Fuente: elaboración propia.

*Los datos indican el valor de la Media ± Desviación Estandar (m3), el número entre paréntesis indica el Coeficiente de Variación (%)

La infiltración del AVU depende de la textura del suelo, el uso del suelo, cobertura vegetación para el área Baldío II, disminuyó la captación debido a que se construyó un bordo, dejando de infiltrar un volumen de 309.48 m³. El área de Baldío sin presentar un cambio de uso de suelo incremento 567 m³, en las áreas donde se realizó la construcción de la infraestructura de equipamiento educativo de las instalaciones de la Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey Campus Toluca, Escuela Normal de Educación Física, Instituto Cultural Mexiquense del Gobierno Estatal. Las zonas con vegetación, área verde, zona de recreativas permiten que el volumen de agua se ha incrementado.

El área verde del Parque Estatal Alameda Poniente San José la Pila, donde se tienen las áreas con vegetación compacta producto de las reforestaciones que se han realizado desde el decreto del AVU, las zonas de pastizal, las áreas recreativas, caminos, pistas, sederos, canchas deportivas. La filtración representa en el área el 68% del área decretada.

Conclusiones

Las áreas verdes urbanas tienen una relevancia ambiental, debido a que estas ofrecen servicios ecosistémicos de regulación como la infiltración. Sin embargo, son objeto de una intensa presión debido al cambio de uso de suelo, las intervenciones urbanas que se realizan mediante los proyectos y programas que diseñan las autoridades locales, afectando el servicio ecosistémico de infiltración. Por ello es importante abordar la gestión

del manejo que realicen las autoridades responsables del área mediante los programas de reforestación, mantenimiento de las zonas de pastizales que permiten incentivar la continuación del servicio ecosistémico.

La formulación del modelo espacial para el análisis del servicio ecosistémico de infiltración en áreas verdes urbanas, en particular para el caso de estudio del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila, ubicado en la ciudad Toluca, permitió evaluar la infiltración anual mediante el cambio de uso de suelo que ha tenido el área decretada del parque del año de 1982 y 2023.

El cambio de uso de suelo de la superficie se ha transformado debido a la concesión de áreas en comodato a instituciones educativas y culturales incrementando las áreas para brindar este tipo de servicios, por lo que el área decretada originalmente, la zona bajo cobertura vegetal actual brinda el mayor volumen de infiltración.

La propuesta metodológica del Modelo espacial del servicio ecosistémico de regulación de infiltración permite la integración de información cartográfica para identificar la superficie que es susceptible para los procesos de infiltración de agua en el área verde, aportando a la recarga de agua al acuífero del valle de Toluca. No obstante, es válido reconocer algunas limitaciones de información que pudieron construirse para determinar el cálculo de la infiltración, tales como la disponibilidad de datos hidrométricos del cauce del río Verdiguél, por lo que se utilizó el método indirecto mediante los sistemas de información geográfica, así como los datos meteorológicos de la precipitación, a pesar de la información de las estaciones meteorológicas no está disponible, debido que no están en funcionamiento o no asocian la intensa transformación urbana que se tiene por el crecimiento de la ciudad.

Por otro lado, la escala de análisis que se utilizó deberá de considerar información del uso de suelo y vegetación a nivel del área verde. Para calibrar el modelo con base al valor K, que está relacionado con la textura del suelo, se recomienda que se realice un análisis de suelo para determinar la textura del suelo y estimar el escurrimiento superficial con los datos obtenidos.

Además, es necesario reconocer que la replicabilidad de este modelo en otros casos de estudios es susceptible siempre y cuando se ajuste a la información actual del uso del suelo y vegetación a una escala de nivel del área verde, debido a que la modelación cartográfica que se propone mediante el diseño del modelo utiliza información ráster a una resolución de un metro para el análisis espacial y cuantificar los metros cúbicos que se infiltran en el área de estudio.

Si bien este trabajo permite reconocer la importancia del servicio de infiltración en el caso de estudio, es necesario contribuir al diseño de un marco integral de análisis de los beneficios que aportan los servicios ecosistémicos en términos sociales, económicos y ambientales, considerando la reserva de carbono, la oferta de espacios recreativos.

Referencias bibliográficas

- Ayuntamiento de Toluca. (2013). Inventario de Áreas Verdes del Municipio de Toluca 2013. https://carbonn.org/uploads/tx_carbonndata/REAS%20VERDES%20MPO.pdf
- Ayuntamiento de Toluca. (2006-2009). Programa de Conservación y Manejo del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila. m <https://docplayer.es/96620712-Programa-de-conservacion-y-manejo-del-parque-alameda-2000.html>
- Baró, F., Palomo, I., Zulian, G., Vizcaino, P., Haase, D., y Gómez-Baggethun, E. (2016). Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: A case study in the Barcelona metropolitan region. *Land Use Policy*, 57, 405–417. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2016.06.006>
- Barzev, R. (2002, August). Guía Metodológica de Valoración Económica de Bienes y Servicios Ambientales. Corredor Biológico Mesoamericano. <https://documents.mx/document/barzev-r2002-guia-metodologica-de-valoracion-economica-de-bienes-y.html?page=1>
- Burkhard, B., y Maes, J. (2017). Chapter 1. Introduction. En Burkhard, J. Maes (Eds.), Mapping ecosystem services, Advanced Books. <https://doi.org/10.3897/ab.e12837>
- Burkhard, B., Crossman, N., Nedkov, S., Petz, K., y Alkemade, R. (2013). Mapping and modelling ecosystem services for science, policy and practice. *Ecosystem Services*, 4, 1–3. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2013.04.005>
- Buzai, G. D. (2012). Geografía y Sistemas de Información Geográfica. Evolución Teórico-Metodológica hacia Campos Emergentes. *Revista Geográfica de América Central* [en línea], 2 (), 15-67. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=451744686001>
- Castany, G. (1975). Prospección y Exploración de las Aguas Subterráneas. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.
- COESPO. (2021). Población y dinámicas urbanas. <https://coespo.edomex.gob.mx/sites/coespo.edomex.gob.mx/files/files/Poblacio%CC%81n%20y%20dinamicas%20urbanas%20Febrero%20COESPO%202021%20digital.pdf>
- CONABIO, (01/06/2020). Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México 2020', edición: 1. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/region/biotic/anpest20gw
- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. v., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., y van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Chen, Y., Ge, Y., Yang, G., Wu, Z., Du, Y., Mao, F., Liu, S., Xu, R., Qu, Z., Xu, B., y Chang, J. (2022). Inequalities of urban green space area and ecosystem services along urban center-edge gradients. *Landscape and Urban Planning*, 217, 104266. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2021.104266>
- de Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., y Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological complexity*, 7(3), 260-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>
- Eigenbrod, F., Bell, V.A., Davies, H.N., Heinemeyer, A., Armsworth, P.R., y Gaston, K.J. (2011). The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services. *Proceedings of The Royal Society B* 278 (1722), 3201–3208.

- Endreny, T. A. (2018). Strategically growing the urban forest will improve our world. *Nature Communications*, 9(1), 1–3. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03622-0>
- Enríquez Pérez, D. C., Padilla Loredó, S., Vela Gutiérrez, G. (2024). Perspectivas agroecológicas en la producción de malanga; un enfoque hacia la sustentabilidad en el estado de Chiapas. *Revista CoPaLa. Construyendo Paz Latinoamericana*, 9(19), 1-22. DOI. 10.35600/25008870.2024.19.0310
- Evans, D.L., Falagán, N., Hardman, C. A., Kourmpetli, S., Liu, L., Mead, B. R., y Davies, J. A. C. (2022). Ecosystem Service Delivery by Urban Agriculture and Green Infrastructure – a Systematic Review. *Ecosystem Services*, 54 (April): 101405. <https://doi.org/10.1016/J.ECOSER.2022.101405>.
- Filipe Narciso, C. (2017). La intervención política en el espacio público: de la experiencia real a la ilusión deformada. *Arquitectura y Urbanismo*, XXXVIII (1), 36-47. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3768/376850994004>
- Frutos, P. de, y Esteban, S. (2009). Estimación de los beneficios generados por los parques y jardines urbanos a través del método de valoración contingente. *Urban Public Economics Review*, (10),13-51. Disponible en : <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50412489001>.
- Gutiérrez Cedillo, J. G., Granados Espíndola, J., y Espinosa Rodríguez, L. M. (2024). Percepción de los servicios ecosistémicos en áreas verdes urbanas: un caso en el altiplano central mexicano. *Papeles de Geografía*, (69). <https://doi.org/10.6018/geografia.577721>
- Geijzendorffer, I. R., Martín-López, B., y Roche, P. K. (2015). Improving the identification of mismatches in ecosystem services assessments. *Ecological Indicators*, 52, 320–331. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2014.12.016>
- Gobierno de México. (2018). Informe Nacional Voluntario para el Foro Político de Alto Nivel Sobre Desarrollo Sostenible.
- Gomez Benitez, DF y Torres Oregon F. 2022. La cosmovision Matlatzinca de los riesgos ambientales Un elemento de sustentabilidad?. *Revista CoPaLa. Construyendo Paz Latinoamericana*, 7(14), 131-142. <https://doi.org/10.35600/25008870.2022.14.0216>
- Gómez-Baggethun, E., y Groot, R. de. (2007). Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. *Ecosistemas*, 16(3), 4–14. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54016302>
- Grimm, N.B., Faeth, S.H., Golubiewski, C.L., Redman, C.L., Wu, J., Bai, X., y Briggs, J.M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science* 319, 756–760.
- Hutton, J. M., y Leader-Williams, N. (2003). Sustainable use and incentive-driven conservation: Realigning human and conservation interests. *ORYX*, 37(2), 215–226. <https://doi.org/10.1017/S0030605303000395>
- Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México (ITDP). (2013). Desarrollo orientado al transporte regenerar las ciudades mexicanas para mejorar la movilidad.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2020). Censo de Población y Vivienda.
- Jenerette, G.D., Harlan, S.L., Stefanov, W.L. and Martin, C.A. (2011), Ecosystem services and urban heat riskscape moderation: water, green spaces, and social inequality in Phoenix, USA. *Ecological Applications*, 21: 2637-2651. <https://doi.org/10.1890/10-1493.1>
- Landscape Institute. (2009). Green infrastructure: connected and multifunctional landscapes. Londres: Landscape Institute Position statement.
- Millennium Ecosystem Assessment, 2003. Assessment: Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment. Island Press.

- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press.
- Nemec, K. T., y Raudsepp-Hearne, C. (2013). The use of geographic information systems to map and assess ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 22(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/S10531-012-0406-Z>
- Nor, A. N. M., Corstanje, R., Harris, J. A., & Brewer, T. (2017). Impact of rapid urban expansion on green space structure. *Ecological Indicators*, 81, 274–284. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.031>
- Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-019-SEMAGEM-DS-2017, (2018) (Poder Ejecutivo del Estado). <https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/gct/2018/feb072.pdf>
- Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Diario Oficial de la Federación de fecha 27/03/2015
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDATU-2022. Espacios públicos en los asentamientos humanos. Diario Oficial de la Federación de fecha 22/02/2022
- Norma Técnica Estatal Ambiental. NTEA-019-SEMAGEM-Ds-2017, que establece las especificaciones técnicas y criterios que deberán cumplir las autoridades de carácter público, personas físicas, jurídicas colectivas, privadas y en general todos aquellos que realicen labores de poda, derribo, trasplante y sustitución de árboles en zonas urbanas del Estado de México.
- ONU-HABITAT; y Sedesol. (2011). Estado de las Ciudades de México 2011. <http://bibliotecadigital.imipens.org/uploads/Estado%20de%20las%20Ciudades%20de-Mexico%202010-2011%20-%20SEDESOL.pdf>
- Pascual Trillo J.A. (2007). La gestión del uso público en espacios naturales. Madrid: Miraguano, D.L. 222 p.
- Pérez-Medina, S., y López-Falfán, I. (2015). Áreas verdes y arbolado en Mérida, Yucatán. Hacia una sostenibilidad urbana. *Economía, Sociedad y Territorio*, XV (47), 1-33. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11132816002>
- Pinho, P., Correia, O., Lecoq, M., Munzi, S., Vasconcelos, S., Gonçalves, P., Rebelo, R., Antunes, C., Silva, P., Freitas, C., Lopes, N., Santos-Reis, M., y Branquinho, C. (2016). Evaluating green infrastructure in urban environments using a multi-taxa and functional diversity approach. *Environ. Res.* 147, 601–610.
- Sánchez-Jasso, J. M. (2010). Programa de Manejo del Parque Estatal Alameda Poniente San José de la Pila (Alameda 2000), Toluca, Estado de México. 10.13140/RG.2.2.36197.93927.
- Sahagún Sánchez, F. J., Aceves Sánchez, J., Sánchez Romero, E., & Plazola Zamora, L. (2020). Valoración de los servicios ecosistémicos en áreas verdes. El caso del Parque Metropolitano de Guadalajara, México. *Acta Universitaria* 30, e2635. doi: <http://doi.org/10.15174.au.2020.2635>
- Salbitano, F., Borelli, S., Conigliaro, M., y Chen, Y. (2017). Directrices para la silvicultura urbana y periurbana (FAO, Ed.; Estudio FAO: Montes). <https://www.fao.org/documents/card/es/c/6a12f562-589e-4cdb-aa28-d3c9c969ef8c/>
- Sofía, E., Camargo, C., Fonseca Carreño, J. A., Manuel, E., y Barón, P. (2012). Los servicios ecosistémicos de regulación: tendencias e impacto en el bienestar humano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(1), 77–83. <https://doi.org/10.22490/21456453.936>
- Sorensen, Mark, Valerie Barzetti, Kari Keipi y John Williams (1998). Manejo de las áreas verdes urbanas | Publications. Documento de Buenas Prácticas. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Manejo-de-las-areas-verdes-urbanas.pdf>

- Sistema para la Consulta de Información Censal 2020. (SCINCE 2020) para escritorio, INEGI. Recuperado de: <https://gaia.inegi.org.mx/scince2020/>
- Twohig-Bennett, C., y Jones, A. (2018). The health benefits of the great outdoors: A systematic review and meta-analysis of greenspace exposure and health outcomes. *Environmental Research*, 628-637. doi:10.1016/j.envres.2018.06.030
- Vázquez Rodríguez, R. (2018). Uso de sistemas de información geográfica libres para la protección del medio ambiente. Caso de estudio: manipulación de mapas ráster con datos climáticos. *Revista Universidad y Sociedad*, 10(2), 158-164. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202018000200158&lng=es&tlng=es
- Tian, Y., Jim, C. Y., Tao, Y., & Shi, T. (2011). Landscape ecological assessment of green space fragmentation in Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 10(2), 79–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2010.11.002>
- Zhang S. y Muñoz Ramírez, F., (2019). Assessing and mapping ecosystem services to support urban green infrastructure: The case of Barcelona, Spain., *Cities*, 92, September. 59-70, <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.03.016>.



Disponible en:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=668180142011>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la
academia

Miguel Martínez Tapia, Gustavo Álvarez Arteaga

**Modelo espacial para el análisis del servicio ecosistémico
de infiltración en áreas verdes urbanas**
**Spatial model for the analysis of the ecosystem service of
infiltration in urban green areas.**

Revista CoPaLa. Construyendo Paz Latinoamericana
vol. 10, núm. 21, p. 1 - 29, 2025
Red Construyendo Paz Latinoamericana, Colombia
investigacion@revistacopala.net

ISSN-E: 2500-8870

DOI: <https://doi.org/10.35600/25008870.2025.21.0370.1>



CC BY-NC-SA 4.0 LEGAL CODE

**Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-
CompartirIgual 4.0 Internacional.**