DECUMANUS
REVISTA INTERDISCIPLINARIA DE ESTUDIOS URBANOS

Investigación

Determinación de la disponibilidad hídrica y soluciones basadas en la naturaleza en demarcaciones territoriales del Valle de México: 1981-2024

Determination of water availability and nature-based solutions in the Valley of México: 1981-2024

José Eduardo Venegas Riveros[1]
Universidad Nacional Autónoma de México, Acatlán
josedven04@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-8783-8872

Jorge López Martínez[2]
Universidad Nacional Autónoma de México, Acatlán
j_lopez@comunidad.unam.mx
https://orcid.org/0000-0001-5656-9923

Recepción: 01 julio 2026
Corregido: 14 octubre 2026
Publicación: 31 octubre 2026

DOI: https://doi.org/10.20983/decumanus.2026.2.5

Resumen

El crecimiento demográfico y la expansión de la huella urbana en las demarcaciones territoriales seleccionadas del Valle de México han comprometido la seguridad hídrica regional. Entre 1981 y 2024, la población de las 72 demarcaciones territoriales analizadas en la Ciudad de México y el Estado de México creció un 85.58%, pasando de 9.1 a más de 16.9 millones de habitantes. Esta antropización desordenada impermeabilizó el suelo natural, anulando la posibilidad de infiltración profunda y provocando una sobreexplotación crítica de los acuíferos, escenario agravado por sequías y anomalías térmicas derivadas del cambio climático. El objetivo del artículo es dimensionar la problemática relacionada con la disponibilidad hídrica a través de la especificación de sus principales factores determinantes en la región de estudio, y proponer algunas medidas de corrección ligadas a las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN). Para ello se construye un Índice de Disponibilidad Hídrica por Precipitación Per Cápita (IDHPPC), que toma en cuenta la precipitación y la población de los municipios de estudio como variable dependiente, en una ruta de modelos de datos panel balanceado de efectos fijos que derivan en un modelo Arellano Bond; como variables explicativas se consideran la temperatura promedio, un rezago del logaritmo del IDHPPC y el logaritmo de la

[1] Maestría en urbanismo Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México.
[2] Profesor de Carrera Asociado. Facultad de Estudios Superiores Acatlán, Universidad Nacional Autónoma de México.

precipitación promedio anual; aunado al modelo se establece una serie de medidas de SbN como una alternativa descentralizada y ecológica, mediante principios de gestión de agua. Derivado parcialmente de la construcción matemática del índice propuesto, se halló dentro del modelo una relación casi unitaria con la precipitación, mediante el rezago añadido al logaritmo del IDHPPC se determinó la existencia de una inercia hídrica relevante, además, el modelo mostró que el incremento en la temperatura promedio anual redujo de forma considerable el IDHPPC, lo que evidencia la importancia del combate al cambio climático y la implementación de SbN.

Palabras clave: Soluciones basadas en la Naturaleza; Estrés hídrico; Índice de Disponibilidad Hídrica por Precipitación Per Cápita, Modelo Arellano Bond; Resiliencia metropolitana.

Abstract

Population growth and the expansion of the urban footprint in selected territorial units of the Valley of Mexico have compromised regional water security. Between 1981 and 2024, the population of the 72 territorial units analyzed across Mexico City and the State of Mexico grew by 85.58%, rising from 9.1 million to over 16.9 million inhabitants. This haphazard urbanization sealed the natural soil surface, eliminating the possibility of deep infiltration and causing critical overexploitation of aquifers—a scenario exacerbated by droughts and temperature anomalies resulting from climate change. This article aims to assess the scale of water availability issues by identifying key determining factors in the study region and proposing corrective measures based on Nature-based Solutions (NbS). To this end, a Per Capita Precipitation-based Water Availability Index (IDHPPC) is constructed, using precipitation and municipal population data; the analysis employs a balanced fixed-effects panel data approach leading to an Arellano-Bond model. Explanatory variables include average temperature, a lagged value of the IDHPPC logarithm, and the logarithm of average annual precipitation. Additionally, a series of NbS measures are proposed as a decentralized, ecological alternative rooted in water management principles. The mathematical construction of the proposed index revealed a near-unitary relationship with precipitation within the model. The inclusion of the lagged IDHPPC logarithm demonstrated significant water inertia, while the model showed that rising average annual temperatures considerably reduced the IDHPPC, highlighting the importance of combating climate change and implementing NbS.

Keywords: Nature-based solutions; Water stress; Per capita precipitation-based water availability Index; Arellano-Bond model; Metropolitan resilience.

Introducción

Entre los años 1981 y 2024, las demarcaciones territoriales seleccionadas del Valle de México, correspondientes a alcaldías de la Ciudad de México y municipios del Estado de México experimentaron una importante transformación estructural y demográfica que ejerció una profunda presión sobre los recursos naturales, de manera particular sobre el agua. Este fenómeno ha sido especialmente crítico en las alcaldías de la Ciudad de México (como Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, etc.) y en los municipios conurbados periféricos del Estado de México (como Ecatepec, Naucalpan, Toluca, Chimalhuacán, Tlalnepantla, etc.), donde la expansión urbana desordenada impermeabilizó el terreno natural, alterando por completo los ciclos hidrológicos naturales. La magnitud de este proceso de antropización queda demostrado al analizar 72 unidades territoriales seleccionadas que integran este estudio: la población conjunta de estas demarcaciones registró un crecimiento del 85.58% en este horizonte de 44 años, al pasar de 9 millones 114 mil 108 habitantes en 1981 a 16 millones 914 mil 320 habitantes en 2024 (INEGI, 2025), lo que se tradujo en una reducción drástica de las áreas de recarga natural y la consecuente sobreexplotación de los sistemas acuíferos

Ante esta grave situación de sobreexplotación hídrica es necesario transitar hacia modelos de urbanización que integren procesos y herramientas sostenibles ambientalmente, como lo son las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN), que se entienden como infraestructura urbana funcional y no únicamente como proyectos paisajísticos aislados, que tratan de integrar procesos ecológicos para mejorar la retención de agua desde su origen y recuperar el ciclo hidrológico perdido. Al desplegar este tipo de estrategias sostenibles (como jardines de lluvia, techos verdes, humedales artificiales, etc.) en las zonas urbanas, esto se traduce en reducir inundaciones recurrentes, disminuir la temperatura en islas de calor y fortalecer la resiliencia climática.

Aunque a nivel global, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y ONU-Hábitat promueven las SbN como parte de este urbanismo sostenible, las experiencias mexicanas muestran un avance desarticulado, ya que estas no pasan de ser programas piloto o esfuerzos aislados con leyes ambientales locales ambiguas y dependencias gubernamentales que se contradicen en su actuar.

Con el propósito de superar estas limitaciones operativas mediante el uso de evidencia científica, el presente artículo tiene como objetivo determinar la disponibilidad hídrica en 72 demarcaciones territoriales seleccionadas del Valle de México, correspondientes a municipios del Estado de México y alcaldías de la

Ciudad de México, para evidenciar el efecto que el cambio de la temperatura y la precipitación pluvial tienen sobre esta, a fin de dimensionar los desafíos que deben enfrentarse a través de estrategias de adaptación hídrica como las SbN. A diferencia de aproximaciones previas eminentemente documentales, este trabajo aporta una sólida base empírica mediante la estimación de un modelo Arellano Bond, el cual permite estimar el impacto que tiene sobre el Índice de Disponibilidad Hídrica por Precipitación Per Cápita (IDHPPC) la precipitación, la temperatura y un rezago del IDHPPC, este último permite determinar el efecto inercia de los cambios de la población y la precipitación sobre la Disponibilidad Hídrica.

La hipótesis que guía esta investigación sostiene que la elevación de la temperatura promedio, y los cambios concernientes en la precipitación pluvial han provocado la disminución de la disponibilidad hídrica, lo que torna urgente la implementación de medidas planificadas y articuladas mediante un marco de gobernanza intersectorial como las SbN en los instrumentos de ordenamiento urbano que permitan fortalecer la resiliencia hídrica y climática del territorio.

El artículo se estructura en siete apartados, el primero corresponde a la presente introducción, el segundo aborda el marco teórico de las SbN y su relación con la adaptación hídrica, el tercero presenta los antecedentes urbanos e hídricos de las demarcaciones territoriales analizadas, el cuarto revisa experiencias nacionales e internacionales relevantes, el quinto presenta la metodología del modelo y sus resultados en la zona de estudio, el sexto apartado discute las barreras y oportunidades de implementación de soluciones bajo el marco normativo institucional nacional, evaluando los alcances de los instrumentos vigentes. Finalmente, el séptimo apartado presenta las conclusiones y recomendaciones prácticas para el ejercicio del urbanismo sostenible y la seguridad hídrica en la región.

Marco teórico

Para entender la crisis hídrica de las demarcaciones urbanas estudiadas, el concepto de estrés hídrico resulta necesario para analizar los desafíos actuales en la gestión del agua en las ciudades. De acuerdo con la SEDEMA (2025), este problema ocurre en el momento en el que la demanda de agua excede la cantidad disponible en un periodo de tiempo determinado o cuando su consumo se limita debido a la baja calidad del recurso. Este indicador mide la disponibilidad de agua per cápita anual en metros cúbicos, estableciéndose que un territorio entra en estrés hídrico cuando existe una disponibilidad menor a 2 mil 500 m^3 por persona. En la actualidad, alrededor de una tercera parte del planeta sufre de este escenario, demostrando la necesidad y la urgencia de gestionar de manera sostenible los recursos hídricos de las ciudades.

Ante este escenario de crisis, han comenzado a surgir las SbN como enfoques que buscan recuperar el equilibrio ecológico ante la degradación ambiental producto del cambio climático. Aunque la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y el Banco Mundial (BM) comenzaron a introducir este concepto a finales de década de los 2000, su primera definición se consolidó hasta el año 2016, entendiendo a las SbN como intervenciones en ecosistemas naturales o en entornos urbanizados; su propósito es resolver problemas sociales mediante acciones que logren estabilizar, de manera simultánea el bienestar de la población y la biodiversidad.

Para que una intervención pueda ser correctamente catalogada como una SbN, es necesario que cumpla con los criterios establecidos en el Estándar Global de la UICN para Soluciones basadas en la Naturaleza (UICN, 2020), los cuales exigen gestionar de manera equilibrada los procesos ecológicos con la seguridad de las comunidades. Por un lado, la acción debe mitigar de forma directa los problemas sociales que suelen relacionarse con vulnerabilidad ante desastres pluviales o el déficit de agua en zonas densamente pobladas; por otro lado, el proyecto debe planificarse con un enfoque de cuenca hidrográfica, reconociendo que los flujos hidrológicos rebasan los límites político-administrativos de cualquier territorio.

Del mismo modo, si se pretende implementar las SbN es necesario obtener una ganancia en biodiversidad endémica e impedir que los procesos de urbanización afecten los servicios ambientales que aún permanecen en las ciudades. Desde una perspectiva financiera y de ejecución, la viabilidad económica y la relación entre costo-beneficio de las SbN debe quedar demostrada en comparación con proyectos de urbanización tradicional. Para lograr sostener este modelo, es necesario que se creen marcos de gobernanza y procesos de participación que transfieran la capacidad de gestión a los actores locales. Por último, el modelo necesita tener un enfoque de gestión adaptativa, desplegando sistemas de monitoreo y evaluación biofísica para calibrar o modificar las intervenciones ante anomalías climáticas que caracterizan el cambio climático.

De acuerdo con Benedict y McMahon (2001) la infraestructura verde puede entenderse desde dos perspectivas complementarias: por un lado, como cualquier plan o estrategia que ofrezca beneficios ambientales a las ciudades, y por otro, como un conjunto de tecnologías aplicadas para mejorar la gestión de los recursos naturales, además es "una red interconectada de áreas naturales y de otros espacios abiertos que conserva valores y funciones ecosistémicas naturales, sustenta el agua y el aire limpios, y provee una amplia gama de beneficios para las personas y la vida silvestre" (Benedict y McMahon, 2001, p. 5).

Desde una visión paisajística y de ordenamiento territorial, Yu (2006, como se citó en Quiroz Benítez, 2018) describe la infraestructura verde como las "estructuras paisajísticas críticas estratégicamente identificadas y planeadas para salvaguardar los procesos naturales, biológicos y culturales del paisaje, asegurando servicios

ecosistémicos esenciales para sustentar la sociedad humana". Por su parte, Naumann et al. (2011) la conciben como una "red de áreas naturales y seminaturales, y espacios verdes urbanos y rurales, terrestres y acuáticos, que mejoran la salud y resiliencia de los ecosistemas, contribuyen a la conservación de la biodiversidad y benefician a la población humana mediante la mejora de los servicios ecosistémicos" (p. 15). Para concluir, Rouse y Bunster-Ossa (2013) la definen como una "red multifuncional de espacios abiertos interconectados que actúa como herramienta de gestión de aguas pluviales al imitar procesos naturales en el entorno urbano" (p. 4), resaltando su relación con la planificación hidrológica y la urbanización.

Incorporar estos principios a los modelos de urbanización propone una alternativa al modelo higienista. La urbanización tradicional trata la escorrentía pluvial como un residuo que debe ser evacuado de la ciudad con rapidez mediante redes de drenaje. Este modelo tiende a ser rígido y colapsa con relativa facilidad ante la expansión urbana y los eventos meteorológicos extremos provocados por el cambio climático. Frente a ello, una gestión descentralizada propone manejar el agua desde su origen, dotando de capacidad adaptativa a las zonas urbanas, para imitar las funciones del ciclo hidrológico natural convirtiendo las precipitaciones en un recurso para la resiliencia hídrica de las ciudades.

Un referente contemporáneo de esta transición es el modelo de urbanización llamado “Ciudad Esponja”, desarrollado en 2012 por el arquitecto chino Yu Kongjian y adoptado por el gobierno chino de manera oficial en 2014 a través del *Sponge City Programme* (Li & Zhang, 2022). Este enfoque es lo contrario al modelo de urbanización tradicional, ya que busca la transformación de superficies impermeables y plantea la retención y el tratamiento de agua pluvial en el sitio de origen. El funcionamiento de ese modelo se sustenta en seis objetivos técnicos:

1. Capturar el agua mediante techos verdes antes de generar escorrentía (retener).
2. Disminuir la velocidad de los flujos mediante canales naturales (ralentizar).
3. Evitar la impermeabilización del terreno natural para permitir la recarga de los acuíferos (infiltrar).
4. Resguardar temporalmente los volúmenes de agua en estanques urbanos (almacenar).
5. Remover contaminantes a través de vegetación y suelos filtrantes (purificar).
6. Aprovechar el agua almacenada en usos no potables (riego de áreas verdes o limpieza) (reutilizar).

El plan estatal que proyectó el gobierno chino estableció la meta de que para 2030 el 80% de las zonas urbanas logren captar y reutilizar por lo menos el 70% del agua de lluvia (Li & Zhang, 2022). Aunque es importante resaltar que este modelo no sustituye o reemplaza la urbanización tradicional, sino más bien se complementan mutuamente; ya que las SbN son efectivas ante precipitaciones de baja a mediana intensidad y las redes de drenaje continúan siendo necesarias ante eventos extremos (Li & Zhang, 2022).

Antecedentes urbanos e hídricos

A nivel global, la interacción entre el acelerado crecimiento demográfico y la urbanización ejerce una presión sin precedentes sobre los recursos hídricos. En 1950, la población mundial se situaba en 2 mil 493 millones de personas, cifra que ascendió exponencialmente hasta alcanzar los 8 mil 161 millones en 2024 (ONU, 2025). Esta explosión demográfica se ha concentrado de manera masiva en entornos urbanos; para el año 2020, datos del Programa de las Naciones Unidas para Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) revelaron que el 60% de la población mundial habita en aproximadamente dos mil zonas metropolitanas.

Como consecuencia directa de este incremento en la demanda, sumado a la transformación de los patrones de consumo global, la disponibilidad de agua por habitante ha experimentado un alarmante declive: mientras que en 1961 el promedio mundial de disponibilidad se situaba en 13 mil 680.24 m^3 por persona, para el año 2024 este indicador se redujo a tan solo 5 mil 326 m^3 al año (Banco Mundial, 2022). El cambio climático ha intensificado la vulnerabilidad del recurso, ya que de acuerdo con la reconstrucción histórica de datos climáticos de la NOAA (2024), evidencia que el incremento global de la temperatura dejó su ritmo natural, pues desde 1850 hasta la segunda mitad del siglo XX el incremento térmico promedió apenas 0.06 °C por década. Sin embargo, a partir de 1975 la tasa de calentamiento se triplicó hasta alcanzar los 0.20 °C por década. De este modo, el incremento térmico global desde 1950 a la fecha se sitúa entre los 1.0 °C y 1.1 °C; lo que consolida a la década de 2015-2024 como la más cálida del registro histórico y altera el equilibrio hidrológico del planeta, efecto que -como se demostrará en el modelo econométrico implementado- tiene efectos determinantes sobre la disponibilidad hídrica.

En la escala nacional, México refleja esta presión global, ya que según el ranking internacional *Aqueduct 4.0* (WRI, 2023) el país se ubica en la vigesimoctava posición global en estrés hídrico. Detrás de esta condición se encuentra el crecimiento demográfico acelerado: la población se multiplicó al pasar de 27.7 millones de habitantes en 1950 a más de 129.8 millones de habitantes en el año 2024 (INEGI, 2025), disparando la demanda del recurso. En la actualidad, existen alrededor de 52 millones de personas habitando zonas metropolitanas ubicadas en el norte y centro del país, regiones caracterizadas por tener climas áridos y semiáridos con una disponibilidad de agua limitada y con una dependencia estructural de los acuíferos subterráneos. Esto ha provocado una caída en la disponibilidad nacional per cápita de agua, contrayéndose de 11 mil m^3 en 1961 a únicamente 3 mil 200 m^3 en 2024, situando a las principales ciudades mexicanas en un escenario de estrés hídrico crítico.

Datos del IMCO (2023) apuntan a que en el norte y centro de México se ha registrado un incremento térmico promedio de 2.4 °C entre 1985 y 2024, acelerando la evaporación y alterando los patrones de precipitación. Como consecuencia directa de este aumento térmico en el país, se han generado sequías graves y recurrentes, ya que tan solo entre los años 2020 y 2024, el territorio nacional afectado por algún grado de sequía escaló del 52.5% a un alarmante 89.5%, impactando principalmente a las regiones semiáridas. Por si fuera poco, la vulnerabilidad física se agudiza a partir de factores institucionales, ya que la gestión del agua divide al país en 13 Regiones Hidrológico-Administrativas cuyos polígonos casi nunca coinciden con los límites estatales o municipales, dificultando la toma de decisiones coordinadas.

Regiones semiáridas clave como Río Bravo, Península de Baja California, Lerma-Santiago-Pacífico y Aguas del Valle de México presentan características desfavorables, combinando alta densidad poblacional con sistemas hidrológicos frágiles, cuencas pequeñas y ríos menos caudalosos. Y a pesar de que México recibe 1.5 millones de hm^3 de lluvia al año, más del 70% se evapora, condicionando una dependencia hacia las fuentes subterráneas, obligando a que el 40% del agua consumida a nivel nacional proceda estas formas, una proporción que alcanza hasta el 90% en las zonas semiáridas debido a la falta de cuerpos superficiales (CONAGUA, 2016).

No obstante, de los 653 acuíferos nacionales, 114 se encuentran sobreexplotados, manifestando además procesos de salinización (33 acuíferos) e intrusión marina (22 acuíferos) que deterioran severamente su calidad (IMCO, 2023). Conforme disminuye la calidad del agua superficial por descargas residuales, las ciudades dependen aún más de los pozos profundos, intensificando la sobreexplotación (IMCO, 2023). La situación se agrava por la infraestructura hídrica urbana, perdiéndose cerca del 46% del agua potable debido a fugas en las tuberías municipales (FES, 2017). En contextos de territorios con alta dependencia de fuentes de abasto subterráneas, estas pérdidas representan un desperdicio importante que agrava la crisis, complementado por la falta de sistemas institucionales de captación e infiltración pluvial y el hecho de que solo una pequeña parte del agua residual recibe tratamiento adecuado (IMCO, 2023).

Este escenario de deterioro ambiental y crecimiento demográfico acelerado adquiere su máxima claridad analítica al examinar las demarcaciones territoriales específicas (municipios y alcaldías) contenidas en la base de datos panel de este estudio. Estas unidades político-administrativas permiten observar cómo las variables agregadas nacionales se traducen en realidades climáticas y demográficas locales diferenciadas a lo largo de las últimas décadas (1981-2024). En primer lugar, la presión demográfica se hace evidente en los municipios consolidados que demandan volúmenes masivos de agua para uso doméstico. Por ejemplo, alcaldías de la Región Hidrológico-Administrativa de Aguas del Valle de México, como Gustavo A. Madero (con una

población superior al millón de personas) y municipios como Ecatepec (con más de 1.6 millones de habitantes), representan el reto de una demanda en constante crecimiento, coexistiendo en el panel con municipios en transición urbano-rural o periferias en expansión como son los municipios de Acambay, Aculco o Isidro Fabela, donde las actividades económicas primarias ejercen un tipo de presión distinta sobre las fuentes de abastecimiento locales.

Por otra parte, en consistencia con el incremento térmico reportado por la NOAA y el Servicio Meteorológico Nacional, la base de datos panel evidencia incrementos térmicos en las temperaturas de los municipios hacia el cierre de la serie histórica (2020-2024). La alcaldía de Coyoacán es un claro ejemplo de este contexto, ya que sus temperaturas promedio anuales pasaron de oscilar entre 17.0 °C - 17.7 °C a principios de la década de los ochenta y alcanzar un pico de 20.4 °C en 2024. Este incremento en las temperaturas a nivel local (con récords históricos registrados como los 34.2 °C en la alcaldía Miguel Hidalgo en 2023) acelera la evaporación local, reduce la oxigenación de los cuerpos de agua y dispara el consumo de agua de la población.

A este incremento de la temperatura se suma la irregularidad en los promedios de precipitación, ya que permite demostrar núcleos de escasez expuestos a este fenómeno. Por ejemplo, en la alcaldía Cuauhtémoc, la estación de la Comisión Nacional del Agua que lleva por nombre “Puente La Llave” registró promedios mensuales de precipitación calculados a partir de los registros de los 12 meses de cada año, inferiores a 10-20 mm, evidenciando una serie de variaciones en el comportamiento a lo largo de la serie. En contraparte, las zonas con mayores precipitaciones como la alcaldía Tlalpan o el municipio de Lerma tampoco logran mejorar la gestión del recurso, ya que la falta de infraestructura para la captación de agua evita que las precipitaciones abastezcan los acuíferos. En resumen, el análisis de los datos panel demuestra que los problemas generados por el cambio climático y el rezago estructural de México, no se distribuyen de manera uniforme ya que los factores analizados anteriormente configuran el núcleo de vulnerabilidad hídrica más urgente para la sostenibilidad urbana.

Experiencias nacionales e internacionales

Alrededor del planeta diferentes ciudades han implementado proyectos de SbN con resultados efectivos, orientados tanto a mitigar y adaptarse a los impactos del cambio climático, como a fortalecer la adaptación y la resiliencia urbana frente a fenómenos hidrometeorológicos cada vez más intensos. Estos ejemplos demuestran la integración de los procesos ecológicos en la infraestructura urbana que pueden mejorar la gestión del agua, reducir riesgos asociados con estrés hídrico y generar beneficios ambientales y sociales. A

continuación, se hace una revisión de diversos casos nacionales e internacionales que pueden funcionar como referentes para comprender el potencial de las SbN en contextos urbanos multidiversos y que ofrecen aprendizajes útiles para su incorporación en ciudades mexicanas ubicadas en zonas áridas.

- Manzo Elementary School, Tucson, Arizona:

  La Escuela Primaria Manzo inició en 2006 un programa escolar de ecología basado en la captación de agua de lluvia, transformando por completo su campus. El plantel realizó algunos cambios a sus instalaciones ya que incorporó un sistema de 16 cisternas que son capaces de abastecer hasta el 90% de la demanda de riego, se reemplazaron jardines con césped por vegetación endémica, espacios de acuaponía, compostaje, huertos urbanos e incluso se añadió un espacio para la conservación de tortugas. Gracias a estas estrategias implementadas se logró reducir de manera importante el consumo de agua dentro de la institución; también se incrementó tanto su matrícula de estudiantes como el desempeño académico de estos, las familias acceden a la producción agrícola y los alumnos pueden comercializar los excedentes. El programa actualmente se mantiene gracias a alianzas con la Universidad de Arizona y diversos apoyos comunitarios.

- Parque inundable La Marjal, Alicante, España:

  Es un proyecto realizado en el año 2015 y ubicado en la costa mediterránea de España, se desarrolló como respuesta a las intensas lluvias torrenciales de la gota fría y a las sequías prolongadas que afectan cada año a la ciudad. El proyecto de 3.6 hectáreas, combina infraestructura verde y tradicional para captar hasta 45 mil m^3 de agua pluvial mediante dos colectores que conducen los escurrimientos hacia sus estanques. En condiciones promedio, las instalaciones del parque pueden almacenar un volumen superior a los 6 mil 600 m^3 de agua que se ocupa para el riego de áreas verdes a través de una red de 70 km.

  La introducción de humedales y de vegetación ribereña ha conseguido restaurar las funciones ecológicas del territorio y también han potenciado la capacidad de infiltración de agua de lluvia hacia los mantos acuíferos. La eficiencia de este modelo quedó demostrada durante el día más lluvioso registrado en 160 años, en donde el parque acumuló alrededor de 22 mil m^3 de escorrentía; así el proyecto cumple dos funciones: reducir las inundaciones en época de lluvia y almacenar agua para temporada de estiaje (Castro, 2021).

- Parque Hídrico La Quebradora, Iztapalapa, Ciudad de México:

Es un proyecto realizado en el 2018 y coordinado por el Instituto de Investigaciones Sociales de la UNAM que integra espacio público y gestión sustentable del agua. A través de una inversión de alrededor de 250 millones de pesos, este proyecto capta las escorrentías que provienen de la Sierra de Santa Catarina, lo que mejora la recarga del acuífero y previene inundaciones en las zonas urbanas colindantes. Esta intervención ha beneficiado de manera directa a una población estimada en 28 mil habitantes al lograr multiplicar por tres la presencia de la vegetación endémica e incrementar el espacio público. El diseño bajo el cual fue realizado este proyecto logró aumentar en cerca de un 35% la captación de agua de lluvia y ha permitido que los humedales artificiales y los procesos anaerobios traten aguas residuales (Castro, 2021).

- Parque Ecológico de la Ciudad de México (Tlalpan, CDMX):

  Como parte del programa gubernamental "Sembrando Parques", este proyecto se realizó en 2021 a través de una inversión pública superior a los 40 millones de pesos. Dicho presupuesto se destinó para mejorar las condiciones y la infraestructura ya existente del parque como los andadores, las ciclopistas y el equipamiento recreativo, incorporando infraestructura verde como jardines de polinizadores y un mariposario. Se priorizaron criterios de bajo impacto ambiental al colocar pavimentos permeables para facilitar la recarga del acuífero y redes de iluminación que son compatibles con los ciclos de la fauna del parque. Con una extensión cercana a las 700 hectáreas, esta intervención busca operar como herramientas que promuevan la educación ambiental y la apropiación comunitaria de esta Área Natural Protegida (Gobierno de la Ciudad de México, 2021).

Análisis cuantitativo regional: especificación del modelo econométrico de datos panel

Con el propósito de estimar y dimensionar cuantitativamente las determinantes de la disponibilidad hídrica para la zona de estudio se establece un modelo econométrico que cuenta con 3 mil 168 observaciones, 72 de corte transversal y 44 puntos temporales.

Análisis cuantitativo regional: especificación del modelo econométrico de datos panel

Se toman datos anuales de precipitación y temperatura promedios provenientes de CONAGUA y de población en número de habitantes obtenidos de los Censos de Población y Vivienda de INEGI, los cuales se interpolaron por el método de Denton, para 72 demarcaciones territoriales seleccionadas del Valle de México, correspondientes a alcaldías de la Ciudad de México y municipios del Estado de México para el periodo 1981-

2024. Con estos datos, se establecen tres modelos de Datos Panel Balanceado con efectos fijos (tras haber realizado la prueba de Hausman). La determinación de dichos municipios y de las variables incorporadas al modelo obedeció a la disponibilidad de los datos, encontrándose casos en que no existía continuidad en alguna de las variables consideradas.

Los datos de temperatura promedio y precipitación promedio provienen de los registros históricos de las estaciones climatológicas de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Cada estación se encuentra identificada con su altitud, longitud, latitud, catalogada con su nombre y clave de estación, lo que permitió asignar cada estación a cada demarcación territorial en la que se encuentran geográficamente. En los casos en donde una demarcación territorial cuenta con más de dos estaciones climatológicas, el valor de la precipitación promedio y temperatura promedio se calculó como el promedio de los registros entre dichas estaciones.

Para medir la Disponibilidad Hídrica Per cápita por localidad se construye el Índice de Disponibilidad Hídrica por Precipitación Per Cápita (IDHPPC), el cual es el resultado de dividir la precipitación pluvial -medida en milímetros por metro cuadrado (mm por m^2)- entre el número de habitantes. La variable explicada del modelo está expresada por la primera diferencia del logaritmo del IDHPPC, como variables explicativas se consideraron el primer rezago de las primeras diferencias del logaritmo del IDHPPC, las primeras diferencias de la temperatura promedio y las primeras diferencias del logaritmo de la precipitación promedio anual pluvial.

La metodología de implementada transita por tres modelos, el primero de ellos es un modelo estático de efectos fijos, para corregirlo se transita al segundo, el cual es dinámico, y el tercero corrige el sesgo de Nickell presentado en el segundo modelo.

La forma funcional del modelo final es:

$$\Delta LIDHPPC_{it} = \alpha + \beta_1 \Delta LIDHPPC_{i,t-1} + \beta_2 \Delta TEMPRO_{it} + \beta_3 \Delta LPREC_{it} + \Delta \varepsilon_{it}$$

Donde:

Δ es el operador de primeras diferencias

$LIDHPPC$ *es el logaritmo del* Índice de Disponibilidad Hídrica por Precipitación Per Cápita

$TEMPRO$ *es la temperatura promedio anual*

$LPREC$ *es el logaritmo de precipitación promedio anual*

α es la constante del modelo

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ *son los parámetros del modelo*

ε es el término de error del modelo

i es el índice de corte transversal

t es el índice de corte temporal

El primer planteamiento es de carácter estático, el cual presentó algunas limitaciones iniciales, que evidenciaron la falta de idoneidad del modelo, como la existencia de autocorrelación; con el fin de corregir dicha autocorrelación se estimaron dos regresiones más para subsanar las violaciones a los supuestos de Gauss-Markov. De esta manera, se construye un modelo dinámico con un rezago en LIDHPPC, que corrige la autocorrelación, sin embargo, introduce el sesgo de Nickell. A fin de subsanar lo anterior, se introduce un tercer modelo Arellano-Bond el cual considera la estimación mediante el Método Generalizado de Momentos el cual resuelve las limitaciones de los dos modelos anteriores y cuya validez se confirma a través de la prueba de Sargan-Hansen (p=0.396), que garantiza la consistencia de los estimadores.

Resultados del modelo

En la Tabla 1 se condensan los resultados de los tres modelos realizados.

	(1)	**(2)**	**(3)**
Variable	**FE Estático**	**FE Dinámico**	**AB-GMM**
Constante (exógena)	-13.381	-12.002	—
Error estándar	(0.141)	(0.178)	—
Valor p	[0.0000]	[0.0000]	—
LIDHPPC(−1)	—	0.147	0.215
	—	(0.016)	(0.003)
	—	[0.0000]	[0.0000]
TEMPRO (exógena)	-0.006	-0.006	-0.095
Error estándar	(0.007)	(0.006)	(0.002)
Valor p	[0.4394]	[0.3567]	[0.0000]
LPRECANUAL	0.965	0.912	0.979
Error estándar	(0.016)	(0.014)	(0.002)
Valor p	[0.0000]	[0.0000]	[0.0000]
Diagnósticos			
R^2	0.9878	0.9902	—
R^2 ajustado	0.9873	0.9899	—
Durbin-Watson	0.023	0.382	—
AR(1) p-value	—	—	0.0000
AR(2) p-vaue	—	—	0.5672
J-statistic	—	—	71.476

Prob. (J-stat)	—	—	0.396
Especificación			
Estimación	1 etapa	1 etapa	2 etapas
Errores estándar	PCSE	PCSE	White period
Efectos fijos	Mun. + Per.	Mun. + Per.	1ras dif.
Efectos temporales	Dummies de	Dummies de	Eliminados 1era dif
Rezagos instrumentos	—	—	@DYN(LIDHPPC,−2,−4)
Número de grupos	72	72	72
Número de	—	—	72
Control Proliferación	—	—	Inst = Grupos (72=72); análisis de robustez con @DYN(LIDHPPC,−2,−3): J-statistic p=0.392
Observaciones	3,168	3,096	2,952
Período	1981–2024	1982–2024	1984–2024

Tabla 1. Resultados de las estimaciones

Fuente. Elaboración propia con base en los resultados de los modelos.

Nota. Errores estándar entre paréntesis ( ); valores p entre corchetes [ ]. PCSE = Panel Corrected Standard Errors (Period SUR). AB-GMM = Arellano-Bond Generalized Method of Moments en primeras diferencias. Instrumentos: @DYN(LIDHPPC,−2,−4), LPRECANUAL(−1), LPRECANUAL(−2), TEMPRO(−1). El R^2 no se reporta para el Modelo 3 dado que el estimador GMM no minimiza la suma de cuadrados. Mun. = municipio; Per. = período; 1ras dif. = efectos fijos eliminados mediante primeras diferencias.

Como se observa en la Tabla 1, en el modelo estático, la constante y la variable explicativa Logaritmo de Precipitación Anual (LPRECANUAL) son significativas, mientras que la variable Temperatura Promedio (TEMPRO) no es individualmente significativa, la r^2 ajustada es alta (0.98), sin embargo, se tiene el problema de autocorrelación, lo que provoca que los estimadores ya no sean de mínima varianza. El modelo dinámico introduce un rezago en el logaritmo del IDHPPC, el cual es significativo, la r^2 ajustada continúa siendo alta (0.98), hay una mejora de la autocorrelación, sin embargo, se introduce el sesgo de Nickell, el cual genera endogeneidad en el regresor LIDHPPC(-1), lo que provoca inconsistencia en la estimación de efectos fijos; para corregirlo, se plantea el Método Generalizado de Momentos (GMM) propuesto por Arellano y Bond (1991), en el cual se construyen rezagos del LIDHPPC en niveles como variables instrumentales para la primera diferencia del rezago LIDHPPC (-1). Las pruebas de correlación serial de AB arrojan autocorrelación de primer orden (AR(1), p=0.0000) y ausencia de autocorrelación de segundo orden (AR(2), p=0.5672) en los residuos, lo que confirma la validez de los instrumentos empleados. La prueba de Sargan-Hansen (p=0.396)

permite no rechazar la validez conjunta de los instrumentos bajo el supuesto de exogeneidad, condición que es necesaria, pero no suficiente para la consistencia de los estimadores. Los efectos temporales se controlaron mediante la inclusión de variables dummys en la ecuación de niveles, que se eliminan por la transformación en primeras diferencias. Es importante resaltar que, aunque el modelo AB fue construido para N grandes y T pequeñas, su aplicación con T=43 se justifica, ya que el objetivo principal es corregir la endogeneidad del rezago LIDHPPC(−1), generada por el sesgo de Nickell, independientemente de la dimensión de temporalidad. Finalmente, se observa que todos los coeficientes estimados son estadísticamente significativos.

Los resultados del modelo GMM permiten identificar los principales determinantes del IDHPPC, el coeficiente de LIDHPPC(-1) es de 0.215, lo que indica que un incremento en 1% en la Disponibilidad Hídrica Per cápita en el periodo anterior genera un incremento de 0.215% en el periodo actual, lo que evidencia la existencia de una inercia hídrica. El coeficiente de TEMPRO es de -0.095, al tener signo negativo muestra una relación inversa, es decir, cuando sube la temperatura la Disponibilidad Hídrica disminuye y cuando baja la temperatura, la Disponibilidad Hídrica aumenta, específicamente, si aumenta 1°C la temperatura promedio anual, el IDHPPC se reduce en un 9.5%,[3] mediante un efecto de evaporación; este hallazgo pone el acento en el cambio climático y en la importancia de la implementación de SbN, que como se ha dicho, revierten en cierta medida el proceso.

Finalmente, el coeficiente de LPRECANUAL es de 0.979, lo que indica que un incremento en 1% en la precipitación promedio anual se asocia a un aumento de 0.979% en el IDHPPC, es decir, se observa una relación casi unitaria, sin embargo, es un resultado esperado derivado parcialmente de la construcción matemática del IDHPPC, su incorporación como variable explicativa obedeció a la necesidad de evitar sesgos por variable omitida en los coeficientes de las demás variables.

Discusión

Los resultados del modelo aquí expuestos fortalecen los resultados de trabajos previos, como el de Vörösmarty, Green et al. (2000), donde proyectan la disminución de la disponibilidad hídrica per cápita en ciudades del mundo debido al incremento de la población, pasando de 150 millones en el año de estudio con escasez hídrica, a mil millones en 2050. Con el cambio climático, el IDHPPC toma relevancia ya que, como se muestra, es afectado por las variaciones en la temperatura promedio y por la inercia hídrica. Por otra parte,

[3] Al estar la temperatura promedio en niveles y no en logaritmo, en la interpretación de los resultados el coeficiente se multiplica por 100.

Jabeen, Iqbal, et al. (2025) realizan un análisis entre precipitación, recarga de acuíferos y disminución de sequías en varios países, mediante un modelo de datos panel dinámico, encontrando igualmente la relación positiva entre precipitación y disponibilidad hídrica. En una visión amplificada, Doeffinger y Hall (2020), utilizando un modelo de panel dinámico de efectos fijos, analizan la relación entre estrés hídrico y productividad económica del agua, donde hallan que conforme la productividad aumenta, el nivel de estrés hídrico baja, es decir, un mejor uso del agua para las labores productivas aminoran el estrés hídrico, manteniendo dentro del modelo como variables de control la temperatura y la precipitación, variables que en el presente trabajo son significativas para la determinación del IDHPPC.

Ante los resultados descritos, se tiene un escenario donde es perentoriamente necesaria la implementación de medidas asociadas a correcciones estructurales, tales como las SbN. De acuerdo con Marchioni, Raimondi et al. (2025) el agravamiento del cambio climático provocará mayores cambios en los patrones de lluvia y elevaciones en los promedios de temperatura, aumentando la frecuencia e intensidad de las lluvias y aumentando los periodos de sequías en la región de Lombardía, ante esta situación las SbN, de acuerdo con los autores, ofrece una alternativa sólida al imitar procesos naturales como la infiltración del agua y la evapotranspiración.

Ferrario, Mourato et al. (2024), muestran que hay un impacto positivo en el medio ambiente urbano derivado de la implementación de SbN, sin embargo, aceptan que no existe aún una medición exacta del grado de positividad que dichas medidas tienen.

Barreras y oportunidades de implementación de SbN en el contexto urbano del valle de México

La incorporación de las SbN en las demarcaciones urbanas del Valle de México se encuentra condicionada por una estructura urbano-ambiental compleja donde confluyen limitaciones institucionales, presupuestales, políticas y técnicas. Al mismo tiempo, surgen oportunidades estructurales derivadas de los nuevos enfoques de gestión territorial y políticas públicas plasmados en el Programa Nacional de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (PNOTDU) 2026-2030 (SEDATU, 2026), el cual impulsa explícitamente la infraestructura verde, la conectividad ecológica y el manejo integral del agua como ejes transversales de la planeación urbana. Bajo este enfoque, resulta necesario analizar a las SbN partiendo de que su viabilidad real radica en una correcta formulación legal dentro de los instrumentos de planeación urbana y ecológica en regiones expuestas a un importante estrés hídrico.

Uno de los impedimentos para la implementación de estas intervenciones proviene de la falta de una perspectiva integral del territorio, donde los métodos tradicionales han sido insuficientes para lograr mitigar

el estrés hídrico y contener el avance de la mancha urbana sobre áreas ecológicamente importantes. La gestión de las SbN requiere enfoques intersectoriales, así como también la concurrencia de los tres sectores de gobierno, la academia, el sector privado y la población en general (Magaña et al., 2021). Ante esto, el nuevo PNOTDU 2026-2030 (SEDATU, 2026) interviene mediante su Objetivo Prioritario 3, diseñado para garantizar la sustentabilidad ambiental y la continuidad de los servicios ecosistémicos en el territorio nacional. Dentro de este objetivo se encuentra la Estrategia Prioritaria 3.1 la cual busca la protección de las zonas de alto valor ambiental y las áreas de recarga acuífera que se encuentren ubicadas en las periferias y las ciudades, funcionando como un sustento jurídico para salvaguardar estas zonas. De esta manera, la Acción Puntual 3.1.2 ordena la integración de los inventarios de infraestructura verde dentro de los planes locales de ordenamiento territorial y desarrollo urbano, esto exige a los municipios a mapear y proteger las zonas de recarga acuífera buscando contrarrestar el sellado del suelo.

Otra limitante importante es la forma en la que se encuentra constituido el país a partir del federalismo que distribuye recursos financieros que obligan a gobiernos estatales y municipales a depender de los fondos federales condicionados (Magaña et al., 2021); reduciendo el margen de maniobra que tienen para impulsar proyectos como las SbN que necesitan de flujo de capital constante para sus fases de diseño, ejecución, operación y mantenimiento a largo plazo. Aunado a esto, se añade la poca coordinación que existe entre los diferentes organismos que se encargan de la planeación urbana, la dotación de agua y el medio ambiente, obstaculizando los intentos de una gestión integral de cuenca. Para intentar hacer frente a este escenario, en el cual se encuentra inmiscuidas las instituciones mexicanas, el PNOTDU en su Objetivo Prioritario 1 promueve un modelo de desarrollo territorial justo y equilibrado apoyándose a través de una gobernanza metropolitana eficaz, operando a través de la Estrategia Prioritaria 1.4 concebida para consolidar mecanismos de gobernanza y coordinación metropolitana para mejorar la gestión de servicios y recursos comunes, y termina materializándose a partir de la Acción Puntual 1.4.2 que impulsa los convenios de coordinación metropolitana para la ejecución de proyectos relacionados con el agua.

A ello se suma que las políticas públicas se diseñan en ciclos cortos, con horizontes de tres y seis años que no permiten sostener proyectos ambientales que requieren maduración y continuidad (Magaña et al., 2021). Este panorama afecta de manera directa los proyectos de SbN, ya que estos cambios en las administraciones gubernamentales (municipales o estatales) suelen congelar este tipo de intervenciones. Sin embargo, el Objetivo Prioritario 4 busca consolidar la adaptación climática bajo una óptica de justicia social. La Estrategia Prioritaria 4.1 de este objetivo busca impulsar la mitigación de los efectos del cambio climático en los

asentamientos humanos y la adaptación basada en ecosistemas, lo cual termina por otorgar un respaldo normativo a los proyectos con SbN.

Otra condición que se cuenta para la implementación de este tipo de proyectos es el acceso limitado a datos de calidad y actualizados existentes, ya que a pesar de los avances tecnológicos en cartografía y en datos georreferenciados, la mayoría de las ciudades mexicanas carecen de plataformas de monitoreo con las cuales se pueda evaluar correctamente los datos de infiltración, calidad de agua, evapotranspiración, etc. (Magaña et al., 2021). El éxito de las intervenciones de SbN dependen de este tipo de monitoreos de los cuales muy pocos municipios logran disponer. Atendiendo este vacío que existe, la Acción Puntual 4.2.1 tiene como objetivo la actualización de los Atlas de Riesgos Municipales, así como también de los Sistemas de Información Territorial y Urbana; incorporando variables climatológicas para realizar acciones preventivas, ofreciendo un soporte que justifica el despliegue de sistemas de evaluación como parte de la gestión del territorio.

Las barreras identificadas en el contexto mexicano son consistentes con las investigaciones internacionales sobre la implementación y la gobernanza de las SbN. En una revisión de 307 obstáculos reportados en talleres de gobernanza a nivel mundial, Martin et al. (2025) demuestran que los factores institucionales y económicos son los más recurrentes. Entre ellos destacan la falta de financiamiento constante, la dependencia de fondos públicos limitados y la persistencia de los marcos normativos que favorecen la infraestructura tradicional, coincidiendo con la dependencia de presupuestos federales y la resistencia cultural y política a las SbN. De igual forma, Wild et al. (2024) evidencian en seis ciudades de Latinoamérica y de Europa que la falta de datos verificables junto con la debilidad técnica municipal, son barreras para la adopción de SbN.

Igualmente, Marchetti et al. (2026) para el caso latinoamericano, en un análisis de doce documentos de políticas públicas en Bogotá, Buenos Aires, Santiago de Chile y São Paulo sitúan a los componentes institucionales y socioculturales como las limitaciones frecuentes (17% cada uno). Si bien los documentos analizados hacen menciones explícitas a la colaboración interinstitucional, en la práctica la gestión opera bajo un esquema fragmentado, coincidiendo con la escasa coordinación entre las dependencias gubernamentales en el contexto mexicano. Los mismos autores documentan que el financiamiento público para las SbN en la región permanece bajo y que los instrumentos de financiamiento se encuentran ausentes en los marcos normativos, reforzando la dependencia del presupuesto federal como una barrera.

Sin embargo, es importante reconocer que las SbN no constituyen una solución universal. Martin et al. (2025) advierten que las SbN no debe sustituir por completo a la infraestructura tradicional, ya que su efectividad depende del grado del evento hidrometeorológico e incurre en riesgos de greenwashing.

Asimismo, Marchetti et al. (2026) documentan que en Latinoamérica estos proyectos pueden llegar a generar procesos de gentrificación verde como ocurrió en el Parque Augusta de São Paulo (Baumgartner, 2021).

Asimismo, la dependencia a la infraestructura tradicional ha terminado siendo una barrera cultural, ya que en los políticos que toman las decisiones gubernamentales sigue existiendo la idea de que las SbN únicamente son elementos ornamentales y terminan ignorando los beneficios naturales que estas proporcionan a los entornos urbanos. Para revertir esta situación, la Estrategia Prioritaria 3.3 promueve la gestión integrada del agua y la restauración de las cuencas hidrográficas urbanas a partir de la Acción Puntual 3.3.1, que instruye a asociar de manera vinculante la gestión y el ordenamiento territorial del suelo con la disponibilidad hídrica real y la recarga de los acuíferos locales. Como complemento, igualmente la acción 3.3.4 ordena incentivar la adopción de ecotecnias urbanas para el tratamiento de las aguas residuales en las zonas urbanas, abriendo un espacio para que estos proyectos se terminen institucionalizando como estrategias para una gestión hídrica funcional.

Actualmente el escenario normativo vigente ofrece oportunidades importantes debido a la inclusión de los proyectos sobre SbN bajo los Objetivos Prioritarios 1, 3 y 4 que terminan proporcionando una base normativa para su implementación en los tres niveles de gobierno. Con base en este marco normativo, se recomienda que las alcaldías y municipios seleccionados del Valle de México aprovechen esto para integrar de forma vinculante a sus planes de ordenamiento y gestión territorial las SbN.

Conclusión

La acelerada expansión demográfica entre 1981 y 2024 que elevó la población de las 72 demarcaciones territoriales seleccionadas en un 85.58% hasta superar los 16.9 millones de habitantes, configura un escenario de creciente presión sobre la disponibilidad hídrica. El análisis realizado muestra que las condiciones de las 72 demarcaciones territoriales seleccionadas correspondientes a alcaldías de la Ciudad de México y municipios del Estado de México se encuentran relacionadas con las variables climáticas analizadas.

La revisión de casos nacionales e internacionales de SbN las identifica como infraestructuras urbanas asociadas a una solución alternativa a la presión hídrica mediante su gestión eficiente. La diversidad de experiencias de aplicación en distintos contextos urbanos permite reconocer formas diferentes de incorporación como parte de las estrategias de gestión urbana en las 72 demarcaciones territoriales seleccionadas.

Ante este escenario, donde la presión hídrica es un componente de gran importancia, se torna indispensable la determinación de la Disponibilidad Hídrica, los hallazgos encontrados a través de la

implementación del Modelo Arellano Bond, evidencian la existencia de inercia hídrica, es decir, las condiciones sobre la Disponibilidad Hídrica proveniente de la Precipitación Per cápita del periodo anterior tiene efectos sobre las condiciones actuales, mayor disponibilidad en el pasado implica mayor disponibilidad en el presente y viceversa; el incremento del 1% en la Disponibilidad Hídrica Per cápita en el periodo anterior genera un incremento de 0.215% en el periodo actual. Por otro lado, la temperatura promedio presenta una relación inversa con la disponibilidad hídrica que se explica por el fenómeno de la evaporación, mayor temperatura, mayor evaporación y menor disponibilidad hídrica y viceversa, concretamente por cada 1°C en que se eleva la temperatura promedio anual, el IDHPPC cae en 9.5%, se encuentra además que por cada aumento del 1% en la precipitación pluvial promedio anual el IDHPPC se incrementa en 0.979%, es decir, hay una relación unitaria, sin embargo, es un resultado esperado, ya que deriva parcialmente de la construcción matemática del índice, a pesar de esta limitación, la variable relacionada con la precipitación pluvial se mantuvo con el propósito de evitar sesgos en los coeficientes de las demás variables.

Lo encontrado en esta investigación fortalece los resultados de trabajos anteriores, como el de Green et al. (2000), donde se proyecta ya la disminución de la disponibilidad hídrica per cápita en las ciudades debido al extraordinario crecimiento de su población; o el de Jabeen, Iqbal, et al. (2025) quienes mediante un modelo de datos panel dinámico determinaron con puntualidad la relación positiva entre precipitación y disponibilidad hídrica.

Ante la problemática planteada las SbN se presentan como una posible alternativa de solución, sin embargo, la revisión de casos muestra la presencia de barreras para su implementación que involucran factores institucionales y económicos, entre los que destacan la falta de presupuesto y la existencia de marcos normativos que favorecen la infraestructura tradicional (Martin et al., 2025). Otro gran obstáculo es la falta de datos verificables que se constituyen en una debilidad técnica para la implementación de las SbN (Wild et al., 2024)

Con base en las evidencias en las implementaciones de las SbN llevadas a cabo, así como las barreras persistentes que no permiten su potencialización, se hace la recomendación de aprovechar el Programa Nacional de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (PNOTDU) 2026-2030 para institucionalizar las SbN en los programas de ordenamiento territorial vigentes, coordinar presupuestalmente a las alcaldías de la Ciudad de México y a los municipios del Estado de México bajo un enfoque de cuenca y fortalecer las redes de monitoreo climatológico local indispensables para sostener una gestión adaptativa frente al cambio climático.

Referencias bibliográficas

Arellano, M., & Bond, S. (1991). Some tests of specification for panel data: Monte Carlo evidence and an application to employment equations. *The Review of Economic Studies*, *58*(2), 277–297. https://doi.org/10.2307/2297968

Banco Mundial [BM]. (2022). *Recursos de agua dulce internos renovables per cápita (metros cúbicos). https://datos.bancomundial.org/indicator/ER.H2O.INTR.PC*

Baumgartner, W. H. (2021). Parque Augusta (São Paulo/Brazil): From the struggles of a social movement to its appropriation in the real estate market and the right to nature in the city. *Sustainability*, *13*(9), Artículo 5150. https://doi.org/10.3390/su13095150

Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2001). *Green infrastructure: Smart conservation for the 21st century*.

Castro, Borja. (2021). *Infraestructura verde urbana I: Retos, oportunidades y manual de buenas prácticas*. Banco Interamericano de Desarrollo.

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2016). *Estadísticas del agua en México 2016*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Doeffinger, T., & Hall, J. W. (2020). Water stress and productivity: An empirical analysis of trends and drivers. *Water Resources Research*, *56*(3), e2019WR025925. https://doi.org/10.1029/2019WR025925

Ferrario, F., Mourato, J. M., Rodrigues, M. S., & Dias, L. F. (2024). Evaluating Nature-based Solutions as urban resilience and climate adaptation tools: A meta-analysis of their benefits on heatwaves and floods. *Science of The Total Environment*, *950*, Artículo 175179. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175179

Friedrich-Ebert-Stiftung (FES). (2017). *La gestión del agua potable en los municipios mexicanos: Ineficiencias estructurales y fugas en la red*.

Gobierno de la Ciudad de México. (2021). *Parque Ecológico de la Ciudad de México*. https://gobierno.cdmx.gob.mx/noticias/parque-ecologico-de-la-ciudad-de-mexico/

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2025). *Censo General de Población y Vivienda, varios años*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/

Instituto Mexicano para la Competitividad [IMCO]. (2023). *Aguas en México, ¿escasez o mala gestión?* Instituto Mexicano para la Competitividad. https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/

Jabeen, M., Iqbal, B. A., Baber, M. Z., & Tabash, M. I. (2025). Threshold analysis of rainfall and groundwater recharge in mitigating drought risks in overexploited groundwater regions. *PMC*. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgaf108

Li, F., & Zhang, J. (2022). A review of the progress in Chinese Sponge City programme: Challenges and opportunities for urban stormwater management. *Water Supply, 22*(2), 1638–1650. https://doi.org/10.2166/ws.2021.327

Magaña-Rodríguez, D., Tudela-Rivadeneyra, E., Meza-Pérez, M., & Suárez-Bonilla, A. (2021). *Infraestructura verde en ciudades mexicanas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura. https://repositorio.fa.unam.mx/bitstream/123456789/19063/1/Infraestructura_verde_en_ciudades_mexicanas.pdf

Marchetti, L., Kauark-Fontes, B., Ortiz Guerrero, C., Hernández-García, J., Wild, T., & Salbitano, F. (2026). The emergence of nature-based solutions in Latin American urban policies: A critical review. The case of Bogotá, Buenos Aires, Santiago de Chile and São Paulo. *Urban Forestry & Urban Greening*, *116*, Artículo 129220. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.129220

Marchioni, M., Raimondi, F., Becciu, G., & Dresti, C. (2025). Nature-based solutions for watershed management: An investigation on water-related ecosystem services delivery at multiple spatial scales. *Ecosystem Services*, *73*, 101718. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101718

Martin, J. G. C., Scolobig, A., Linnerooth-Bayer, J., Irshaid, J., Aguilera Rodriguez, J. J., Fresolone-Caparrós, A., & Oen, A. (2025). The nature-based solution implementation gap: A review of nature-based solution governance barriers and enablers. *Journal of Environmental Management*, *388*, Artículo 126007. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126007

National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2024). *Climate Change: Global Temperature*. Climate.gov.

Naumann, S., Anzaldua, G., Berry, P., Burch, S., Davis, M., Frelih-Larsen, A., Gerdes, H., & Sanders, M. (2011). *Assessment of the potential of ecosystem-based approaches to climate change adaptation and mitigation in Europe*. Final report to the European Commission, DG Environment, Contract no. 070307/2010/580412/SER/B2, Ecologic Institute and Environmental Change Institute.

Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2025). Perspectivas de la Población Mundial: La Revisión de 2024. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, División de Población.

Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos [ONU-Hábitat]. (2020). *Estado Global de las Metrópolis 2020: Folleto de datos poblacionales*. https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/08/gsm_-_folleto_de_datos_poblacionales_2020.pdf

Quiroz Benítez, D. E. (2018). *Implementación de infraestructura verde como estrategia para la mitigación y adaptación al cambio climático en ciudades mexicanas: Hoja de ruta*. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

Rouse, D., & Bunster-Ossa, I. (2013). Green infrastructure: a Landscape Approach.

Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano [SEDATU]. (2026). *Programa Nacional de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano 2026–2030*. Gobierno de México.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México [SEDEMA]. (2025). *Glosario-Definición: Estrés hídrico*. http://data.sedema.cdmx.gob.mx:9000/datos/glosario-definicion/Estr%C3%A9s%20h%C3%ADdrico

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN]. (2020). Estándar Global de la UICN para Soluciones basadas en la Naturaleza. Un marco sencillo para la verificación, el diseño y la extensión de SbN. Primera edición. Gland, Suiza: UICN

Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. *Science*, *289*(5477), 284–288. https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284

Wild, T., Baptista, M., Wilker, J., Kanai, J. M., Giusti, M., Henderson, H., Rotbart, D., Amaya Espinel, J.-D., Hernández-García, J., Thomasz, O., & Kozak, D. (2024). Valuation of urban nature-based solutions in Latin American and European cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, *91*, Artículo 128162. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128162

World Resources Institute [WRI]. (2023). *Aqueduct 4.0: Current and future country rankings*. Recuperado de https://www.wri.org/data/aqueduct-40-country-rankings