UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

División de Ciencias Económico-Administrativas

Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales

EVALUACIÓN DE HUELLA HÍDRICA AZUL EN EL PARQUE ECOLÓGICO DEL LAGO DE TEXCOCO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE: **MAESTRA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS NATURALES**

PRESENTA:

CLAUDIA RUBI QUINTANA DOMINGUEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE

Dr. Ramón Valdivia Alcalá.

Chapingo, Texcoco, Méx., noviembre de 2026

"EVALUACIÓN DE HUELLA HÍDRICA AZUL EN EL PARQUE ECOLÓGICO DEL LAGO DE TEXCOCO"

Tesis realizada por Claudia Rubí Quintana Domínguez, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRIA EN CIECIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS NATURALES

DIRECTOR

DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ

ASESOR

DR. JUAN HERNÁNDEZ ORTIZ

ASESOR

DR. FERMIN SANDOVAL ROMERO

CONTENIDO

EVALUACIÓN DE HUELLA HÍDRICA AZUL EN EL PARQUE ECOLÓGICO DEL LAGO DE TEXCOCO I

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL 13

1.1 Planteamiento del problema 16

1.2 Objetivos 18

1.2.1 Objetivo general. 18

1.2.2 Objetivo específico: 18

1.3 Hipótesis de la investigación 18

1.3.1 Hipótesis general. 18

1.3.2 Hipótesis especificas 19

1.4 Justificación. 19

1.5 Estructura del documento 21

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA 23

2.1Huella Hídrica 24

2.1.1Aplicación de la huella hídrica en contextos urbanos. 25

2.1.2 Casos de estudio de huella hídrica en turismo y recreación. 28

2.1.3 Cálculo de huella hídrica azul directo para uso domestico 31

2.2 Seguridad hídrica 33

2.3 Sostenibilidad hídrica 35

2.4 Condiciones hídricas en la cuenca del valle de México 42

2.5 Acuífero Texcoco 48

CAPÍTULO 3. HUELLA HÍDRICA AZUL EN EL PARQUE ECOLÓGICO DEL LAGO DE TEXCOCO 66

3.1 Resumen 66

3.2 Introducción 68

3.3 Metodología 70

3.3.2 Huella hídrica azul directa por visitante 73

3.3.3 Huella hídrica del consumo promedio de agua potable por persona 74

3.3.4 Huella hídrica por uso sanitario 75

3.3.5 Huella hídrica por uso de lavamanos (vi,Lavamanos) 75

3.3.6 Huella hídrica total por usuario según su consumo de sanitario, lavamanos y agua potable promedio ingerida: 76

3.3.7 Huella hídrica total por fin de semana del consumo de sanitario, lavamanos y agua potable ingerida por cada usuario (HHfs): 76

3.3.8 Huella hídrica anual (HHanual) 76
3.3.9 Evaluación de huella hídrica por water footprint 77
3.4 Validación de datos 77
3.5 Resultados 78
3.6 Discusión 84
3.7 Conclusiones 87
3.8 Literatura citada 89
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES 90
CAPÍTULO 5. LITERATURA CITADA 92

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 HH por tipo de usuario en México 32
Cuadro 2 Zonas administrativas en materia de recursos hídricos 42
Cuadro 3 Volúmenes brutos usados de agua subterránea (hm3/año)..... 45
Cuadro 4 Disponibilidad del acuífero correspondiente a la zona administrativa XIII..... 46
Cuadro 5 Comparación de comportamiento de nivel estático 2009 & 2024 53
Cuadro 6 Formato de encuesta 72
Cuadro 7 Elaboración propia con datos de encuestas realizadas en el PELT..... 79
Cuadro 8Litros ocupados en el uso de sanitario por cada usuario 80
Cuadro 9 Tiempo promedio de lujo de agua por usuario..... 81
Cuadro 10 Uso de lavamanos por usuario..... 81
Cuadro 11 Huella hídrica individual de los visitantes encuestados estimada mediante la calculadora Water Footprint 83
Cuadro 12 Disposición a pagar..... 84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura de tesis 22
Figura 2 Zonas administrativas en materia de aguas del subsuelo (acuíferos) 43
Figura 3 Zonas administrativas en materia de aguas superficiales (cuencas) 43
Figura 4 Localización del acuífero 49
Figura 5 Zonas administrativas en materia de aguas superficiales (cuencas) 51

SIGLAS Y ABREVIATURAS

APRN. Área de Protección de Recursos Naturales

CEPAL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua

DMA. Disponibilidad Media Anual

DNC. Descarga Natural Comprometida

HH. Huella hídrica

HHanual. Huella hídrica anual

HHfs. Huella hídrica por fin de semana

HHU. Huella hídrica urbana

NOM. Norma Oficial Mexicana

ONU. Organización de las Naciones Unidas

PELT. Parque Ecológico Lago de Texcoco

PNUD. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

REPDA. Registro Público de Derechos de Agua

VEAS. Volumen de Extracción de Aguas Subterráneas

DEDICATORIAS

Primeramente, doy gracias a Dios porque cumple sus promesas y sus propósitos en mi vida, y a través de cada experiencia me enseña más acerca de Él.

A mi papá, por ser la fuente de inspiración más grande en mi vida. Por sus sabios consejos, por ese amor inmenso que nunca permitió que me faltara, y sobre todo, por su apoyo incondicional. Todo lo positivo que habita en mí, cada logro y cada sueño alcanzado, se lo debo.

A mis queridos amigos Ale, Diego, Alonso, Abel, Xani, Vero, Roxana y Carlos: gracias de todo corazón por su amistad sincera y por cada instante que hemos compartido juntos. Por el apoyo académico, moral y emocional que ha transformado este proceso en una experiencia más ligera y provocado que formemos “una pequeña familia por elección” estaré eternamente agradecida.

A Abel por apoyarme y motivarme desde que nos conocimos en licenciatura y nuevamente en este actual proceso de manera académica y moral.

A la Doctora Dixia, por su destacada humanidad y apoyo oportuno, y al Doctor Juan, quien, además de ser parte fundamental de mi formación, supo brindarme las palabras adecuadas para motivarme a concluir este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma Chapingo por brindarme la oportunidad de continuar con mi formación profesional y abrirme sus puertas. Valoro profundamente los conocimientos, herramientas y experiencias adquiridas durante esta etapa, las cuales han contribuido significativamente a mi desarrollo académico y personal. Formar parte de esta institución constituye para mí una experiencia enriquecedora que conservaré más allá de la conclusión de mis estudios.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de posgrado.

Agradezco a la División de Ciencias Económico-Administrativas por los conocimientos y herramientas proporcionados a lo largo de mi formación de posgrado.

Finalmente, expreso mi profundo agradecimiento al Dr. Ramón Valdivia Alcalá, director de mi tesis, así como a los integrantes de mi Comité Asesor, por su acompañamiento y orientación durante todo este proceso. Valoro enormemente el tiempo dedicado a mi trabajo, la paciencia mostrada, los conocimientos compartidos y cada una de sus observaciones y recomendaciones. Su disposición para resolver mis dudas y guiarme en las diversas etapas de esta investigación ha sido invaluable. Gracias por contribuir no solo al desarrollo y mejora de este trabajo, sino también a mi crecimiento académico y profesional.

DATOS BIOGRÁFICOS



- **Datos personales**

Nombre: Claudia Rubí Quintana Domínguez:

Fecha de nacimiento: 16 de febrero del 2000

Lugar de nacimiento: Estado de México

CURP: QUDC000216MMCNMLA5

Profesión: Licenciada en Economía

Cedula profesional: 14147122

- **Desarrollo académico**

Preparatoria: PREPARATORIA AGRICOLA CHAPINGO
Generación 2015-2018

Licenciatura: Generación 2018 – 2022

Maestría: Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, Universidad Autónoma Chapingo, 2024–2026.

RESUMEN GENERAL

EVALUACIÓN DE HUELLA HÍDRICA AZUL EN EL PARQUE ECOLÓGICO DEL LAGO DE TEXCOCO[1]

El uso eficiente del agua es de especial importancia en espacios urbanos y recreativos ubicados en regiones con alta presión sobre los recursos hídricos. En este sentido, la huella hídrica permite analizar el consumo de agua asociado a las actividades humanas e identificar los principales usos que influyen en su demanda. El objetivo de esta investigación fue cuantificar la huella hídrica azul directa generada por las visitas de usuarios al Parque Ecológico Lago de Texcoco (PELT), con el fin de aportar información que contribuya a mejorar la gestión del recurso hídrico en el parque. Para ello, se aplicó una encuesta a 50 visitantes durante dos fines de semana consecutivos y se utilizaron datos operativos proporcionados por la administración del PELT. El análisis se enfocó principalmente en el uso de sanitarios, lavamanos y el consumo de agua potable durante la estancia de los visitantes. Considerando un volumen operativo aproximado de 50,000 litros por periodo y una afluencia promedio de 2,859 visitantes, se estimó una huella hídrica azul directa de 17.49 litros por visitante, bajo el supuesto de un flujo de retorno igual a cero. El uso combinado de sanitarios y lavamanos representa aproximadamente el 51.91 % del volumen operativo promedio estimado por visitante. Adicionalmente, el 96 % de los encuestados manifestó una disposición favorable a pagar por los servicios proporcionados por el parque, con un promedio declarado de $34.40 por visitante. Los resultados constituyen una primera aproximación cuantitativa de la huella hídrica azul directo asociada con los visitantes y la operación del PELT, y permiten establecer un indicador de referencia para el monitoreo del consumo de agua, así como para identificar oportunidades que contribuyan a mejorar la eficiencia y la gestión del recurso hídrico.

Palabras clave: Huella hídrica azul, consumo de agua, gestión de los recursos hídricos, Turismo, Conservación del agua

Tesis de Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, Universidad Autónoma Chapingo.

[1] Tesis de Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Claudia Rubi Quintana Dominguez
Director: Ramon Valdivia Alcalá

ABSTRACT

BLUE WATER FOOTPRINT ASSESSMENT AT THE TEXCOCO LAKE ECOLOGICAL PARK[2]

Efficient water use is particularly important in urban and recreational areas located in regions where water resources are under considerable pressure. Water footprint assessment provides a means of examining water consumption associated with human activities and identifying the main uses that contribute to water demand. This study aimed to quantify the direct blue water footprint associated with visits to the Texcoco Lake Ecological Park (PELT) and to provide information that could support improved water resource management within the park. Data were collected through 50 visitor surveys conducted over two consecutive weekends and supplemented with operational information provided by the PELT administration. The analysis focused primarily on water use in toilets and handwashing facilities, as well as drinking water consumption during each visit. Based on an approximate operational water use of 50,000 liters per period and an average attendance of 2,859 visitors, the direct blue water footprint was estimated at 17.49 liters per visitor, assuming zero return flow. Water use in toilets and handwashing facilities combined accounted for approximately 51.91% of the estimated average operational water use per visitor. In addition, 96% of respondents expressed a willingness to pay for the services provided by the park, with an average stated amount of $34.40 per visitor. These findings provide an initial quantitative estimate of the direct blue water footprint associated with visits to and operations at the PELT. The estimated value can serve as a baseline indicator for monitoring water use and identifying opportunities to improve water-use efficiency and water resource management within the park.

Keywords: Blue water footprint, Water consumption, Water resources management, Tourism, Water conservation.

[2] Master in Science Thesis in Agricultural and Natural Resources Economics, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Claudia Rubi Quintana Dominguez
Advisor: Ramon Valdivia Alcalá

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El agua es un recurso fundamental e indispensable para el desarrollo de las actividades humanas, económicas y ambientales. Sin embargo, el crecimiento poblacional, la urbanización y la mayor demanda han generado una presión creciente sobre las fuentes disponibles. Ante esta situación, se ha vuelto relevante ampliar los enfoques de análisis del aprovechamiento del recurso hídrico. En este contexto, la huella hídrica se ha posicionado como una herramienta valiosa para evaluar la apropiación de los recursos de agua dulce en relación con diversas actividades humanas, tomando en cuenta tanto el origen del recurso como la forma en que es utilizado (Hoekstra et al., 2011).

Aunque el concepto de huella hídrica fue inicialmente desarrollado para analizar el consumo de agua asociado a la producción e intercambio de bienes, su aplicación se ha expandido hacia diferentes escalas territoriales y actividades económicas. En los contextos urbanos, este enfoque facilita el estudio de los usos directos relacionados con el abastecimiento, el consumo doméstico, los servicios y las actividades sanitarias, en los cuales la huella hídrica azul adquiere especial relevancia debido al aprovechamiento de fuentes superficiales y subterráneas (Zapata-Pinedo et al., 2026). De este modo, el análisis de la huella hídrica complementa los indicadores convencionales de abastecimiento, permitiendo obtener una comprensión más detallada de la relación entre las actividades realizadas en un territorio y los recursos hídricos necesarios para sostenerlas.

En estos espacios, las actividades turísticas y recreativas también generan una demanda de agua vinculada a la presencia de visitantes y a los servicios requeridos para atenderlos. El agua puede ser utilizada directamente para consumo humano, servicios sanitarios, lavamanos, limpieza, mantenimiento y otras actividades relacionadas con la operación de estos sitios. Por consiguiente, la demanda hídrica no depende únicamente de la población residente de manera permanente en un territorio, sino también de la cantidad de visitantes y de los periodos en que se concentra su afluencia (Gossling et al., 2012; Casals Miralles

et al., 2023). Desde esta perspectiva, los visitantes pueden representar un incremento temporal en la población usuaria, generando así una demanda adicional sobre las fuentes locales de abastecimiento (Hadjikakou et al., 2013).

La literatura relacionada con el turismo y la recreación ha evidenciado la utilidad de expresar el consumo de agua mediante indicadores normalizados por visitante y unidad de tiempo, ya que facilitan la comparación entre distintos espacios y períodos con niveles variados de afluencia, así como la identificación de cambios en la intensidad del uso del recurso (Zhang et al., 2017; Casals Miralles et al., 2023). Este tipo de indicadores adquiere una relevancia particular cuando las actividades recreativas se desarrollan en territorios con disponibilidad limitada de agua, dado que un mismo volumen consumido puede tener diferentes implicaciones según las condiciones de la fuente de abastecimiento. En este contexto, Hoekstra et al. (2012) señalan que el análisis de la huella hídrica azul resulta de mayor importancia cuando se relaciona con la disponibilidad de agua azul en la cuenca y con los requerimientos ambientales asociados.

Esta relación entre consumo y disponibilidad resulta particularmente importante en el Valle de México, donde la concentración de población y actividades económicas ha incrementado la presión sobre los recursos hídricos. En este territorio, las aguas subterráneas representan una fuente fundamental para satisfacer diferentes demandas, por lo que la extracción sostenida del recurso debe analizarse considerando las condiciones particulares de los acuíferos. En el caso de Texcoco, la presión existente sobre el agua subterránea vuelve necesario conocer no solamente los grandes volúmenes destinados a los principales usos, sino también aquellos consumos asociados con nuevas actividades y servicios que se desarrollan dentro de la región.

En este contexto, el PELT un espacio dedicado a la recuperación ambiental y al desarrollo de actividades recreativas que, debido a su funcionamiento y afluencia de visitantes, requiere agua para diversos servicios, por lo que la relevancia de analizar su huella hídrica azul directa radica en la capacidad de identificar y cuantificar el consumo específico asociado a sus usuarios, particularmente aquel

relacionado con actividades como el uso de sanitarios, lavamanos y el consumo directo de agua. Este enfoque permite pasar de una estimación general del agua utilizada en el espacio recreativo a un indicador que refleja la intensidad de consumo por visitante, facilitando así el análisis de su magnitud en relación con las condiciones hídricas del territorio donde se desarrolla la actividad.

La investigación adquiere mayor relevancia dado que, a pesar de la existencia de una amplia literatura sobre la huella hídrica aplicada a la agricultura, urbanismo y turismo, son escasos los estudios que aborden específicamente la huella hídrica azul directa generada por los usuarios en espacios recreativos urbanos y su relación con las fuentes subterráneas sometidas a presión. Por consiguiente, la evaluación de la huella hídrica azul en el PELT permitirá partir de una información sobre un nivel de consumo que ha recibido relativamente poca atención, además de contribuir a comprender la relación entre la afluencia de visitantes, los servicios utilizados y el volumen de agua requerido para atender dichas necesidades.

Finalmente, conocer la huella hídrica asociada con los usuarios puede aportar elementos para identificar los componentes que concentran una mayor demanda, detectar oportunidades para mejorar la eficiencia de los dispositivos e instalaciones y establecer medidas orientadas al ahorro del agua. En este sentido, la investigación no pretende únicamente determinar un volumen de consumo, sino generar información que permita relacionar las actividades recreativas con las condiciones del recurso hídrico disponible y que pueda servir como apoyo para la gestión del agua dentro del Parque Ecológico Lago de Texcoco. De esta manera, el estudio vincula la cuantificación de la huella hídrica con una problemática territorial concreta y contribuye al análisis del uso sostenible del agua en espacios recreativos localizados en regiones sometidas a presión hídrica. A partir de este contexto, resulta necesario identificar el problema específico que da origen a la investigación y las condiciones hídricas y territoriales que justifican su análisis.

1.1 Planteamiento del problema

Valorar económicamente el ambiente consiste en asignar valores cuantitativos a sus bienes y servicios, independientemente de la existencia de precios de mercado. Esto supera la función del mercado, puesto que muchas veces no hay mercados que establezcan precios para estos recursos. La valoración muestra que el ambiente no es gratuito, y el reto es determinar en qué términos expresar su valor (Tomasini, D. (s. f.).

De acuerdo con Uribe Visoso y Vázquez del Mercado (2017) en un período de tan solo unas décadas, la República Mexicana ha experimentado una transformación significativa en la disponibilidad de recursos hídricos, pasando de ser un país con un acceso relativamente amplio al agua, a enfrentarse a una grave situación de escasez de este recurso vital. Este cambio sustancial puede atribuirse al crecimiento poblacional acelerado, a la creciente demanda derivada de múltiples actividades humanas y económicas, así como a deficiencias en la gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos. Como resultado, se ha generado una presión sin precedentes sobre los sistemas hídricos, poniendo en riesgo la sustentabilidad y el bienestar de las comunidades y ecosistemas del país.

El presente trabajo de investigación, al integrar los conceptos de huella hídrica, externalidades ambientales y economía de los recursos naturales, busca aportar una visión integral sobre el impacto de recursos naturales (agua) y economico del uso recreativo del agua asociado al Parque Ecológico Lago de Texcoco, el cual forma parte de un proceso de restauración ecológica en una cuenca que ha experimentado profundas transformaciones, desde su drenaje durante la época colonial hasta su urbanización y su reciente revalorización como infraestructura ambiental y recreativa.

La región de Texcoco se ubica dentro de la Cuenca de México, una de las zonas con mayor presión sobre los recursos hídricos del país debido al crecimiento poblacional, la expansión urbana y el desarrollo industrial. En esta región, el acuífero Texcoco (clave 1507) constituye una fuente estratégica de

abastecimiento de agua, particularmente para el uso público urbano. Sin embargo, la extracción intensiva ha generado un proceso de sobreexplotación que se manifiesta en el descenso continuo de los niveles del agua subterránea.

De acuerdo con el balance hidrogeológico elaborado por la Comisión Nacional del Agua, la recarga total media anual que recibe el acuífero Texcoco, clave 1507, es de 145.1 millones de metros cúbicos por año. Por otro lado, el volumen de agua que se descarga de manera natural a través de manantiales y ríos es de 10.4 millones de metros cúbicos anuales. Además, la extracción de aguas subterráneas alcanza un total de 284,5 millones de metros cúbicos anuales, datos que superan la recarga del acuífero. Toda esta información, reportada por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del 30 de diciembre de 2022, revela que actualmente no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones. Por el contrario, se presenta un déficit de 149,8 millones de metros cúbicos anuales, lo cual resalta la necesidad de fortalecer los instrumentos de gestión y fomentar una asignación eficiente del recurso hídrico, especialmente en un contexto de alta escasez relativa del recurso.

En este contexto, la consolidación de espacios recreativos de gran escala, como el parque, genera nuevas demandas de servicios hídricos asociados al uso sanitario, limpieza y consumo directo por parte de los visitantes. No obstante, existe una limitada evidencia empírica sobre la magnitud de la huella hídrica azul directo vinculada a este tipo de actividades en espacios urbanos de restauración ecológica, así como sobre su impacto económico y su contribución a la presión sobre acuíferos sobreexplotados.

Asimismo, la ausencia de información sobre el costo implícito del consumo de agua en actividades recreativas dificulta evaluar el costo de oportunidad del recurso, la eficiencia en su uso y la sostenibilidad económica de este tipo de proyectos públicos. Desde la perspectiva de la economía ambiental, esta brecha limita la formulación de políticas orientadas a la conservación, el uso eficiente del agua y la internalización de externalidades. Por lo tanto, resulta relevante estimar

la huella hídrica azul directa asociada a los usuarios del parque, con el propósito de generar información que contribuya a la planificación hídrica, la gestión sustentable del recurso y la toma de decisiones en materia de política pública y desarrollo urbano

1.2 Objetivos

En los apartados siguientes se presenta de manera detallada el objetivo general de la investigación, así como los objetivos específicos que lo complementan y sostienen, con el fin de ofrecer una visión clara del alcance y las metas del estudio.

1.2.1 Objetivo general.

Cuantificar la huella hídrica azul directa asociada a las visitas de los usuarios al Parque Ecológico Lago de Texcoco, con el fin de conocer el consumo de agua relacionado con las actividades que realizan durante su estancia y generar información que contribuya a mejorar la gestión del recurso hídrico en el parque.

1.2.2 Objetivo específico:

1. Cuantificar la huella hídrica azul directa de una muestra de los usuarios del parque Ecológico del Lago de Texcoco y partir de ellos tomar los resultados como muestra para estimar la huella hídrica a un año.

2. Identificar y determinar con los usos que contribuyen de manera significativa a la generación de la huella hídrica, con el fin de optimizar recursos y promover prácticas sostenibles.

1.3 Hipótesis de la investigación

Dados los objetivos de la investigación, se establecen hipótesis que ofrezcan respuestas anticipadas al problema de investigación planteado.

1.3.1 Hipótesis general.

Los resultados del estudio reflejaran el impacto social de los usuarios en el consumo de agua domestico el cual podrá ser útil para la posible elaboración de

mejores prácticas o políticas públicas que mejoren el uso eficiente del agua, así como al ser difundida aporte a la concientización del valor de este recurso escaso.

1.3.2 Hipótesis especificas

- La huella hídrica azul directa vinculada a los usuarios del Parque Ecológico Lago de Texcoco se encuentra principalmente relacionada con el uso de sanitarios y lavamanos, los cuales constituyen la mayor proporción del consumo total de agua por visitante.

- El impacto de huella hídrica azul del Parque Ecológico de Texcoco muestra un porcentaje significativo al consumo de agua extraído del acuífero Texcoco, clave 1507.

- Los resultados de la estimación de la huella hídrica aportaran un soporte para la formulación de políticas en el PELT, para el uso, protección y gestión de los recursos hídricos, con el propósito de equilibrar la conservación del agua a largo plazo.

1.4 Justificación.

El agua es la base del desarrollo humano y la estabilidad planetaria, la base de la producción de alimentos y energía, la seguridad humana entre otros beneficios, por lo que cuando fallan los sistemas hídricos, las consecuencias repercuten en las economías y las sociedades Madani, K. (2026).

Según un informe de la UNU-INWEH declara que el sistema global humano-hídrico en su conjunto ya ha entrado en la era de la bancarrota hídrica global. Madani, K. (2026) Por lo que resulta prioritario implementar medidas que nos permitan gestionar de manera sostenible los recursos hídricos, en respuesta al incremento de la demanda y las presiones ambientales (FAO, 2023).

Actualmente se visualiza a la humanidad como una fuerza de cambio resaltando su influencia sobre los ciclos biogeoquímicos, por lo que un grupo de investigadores propone los limites planetarios (LP), debido a que el agua de

consumo humano es cada vez mas escasa uno de los LP que propone Rockstrom (2009) considera la cantidad máxima de agua dulce consumida a nivel global, si se analiza a nivel cuenca, en partícula la del Valle de México se muestra que los niveles de consumo de agua rebasan los límites establecidos de extracciones lo que representa un estado de alta vulnerabilidad hídrica.

Según un informe de UNU-INWEH, el sistema global humano-hídrico en su conjunto ha ingresado en la era de la crisis hídrica a nivel mundial (Madani, K., 2026). Por lo que resulta prioritario establecer medidas que aseguren una gestión sostenible capaz de responder a las crecientes demandas y presiones sobre este recurso. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023).

En este contexto esta investigación parte con el objetivo de hacer una valoración del recurso hídrico estableciendo una interdependencia entre lo urbano y lo ambiental relacionadas con los limites biofísicos locales y regionales, aportando como dato el impacto de HH realizado por los usuarios en el uso sanitario para posteriores medidas de control así como información que concientice a los usuarios en conjunto del uso y valor del que son beneficiarios ya que como menciona Hanneman (2006) el problema del agua no es solo de economía, política y gobernabilidad sino también depende en parte de la actitud y disposición de las personas, su acción colectiva , y en parte de la realidad física.

En esta dimensión, se pretende que la economía favorezca un mejor uso del agua urbana, para mejorar su eficiencia como un recurso cada vez más escaso. Se basa en el criterio de que el sistema debe ser autosuficiente en relación a su costo; en donde los costos, no excedan los beneficios, centrando principalmente el aumento del bienestar humano mediante la asignación y distribución óptima del agua (Balkema et al., 2002)

Y, en cuanto a la accesibilidad económica, es importante una estructura tarifaria, a través del mecanismo de precios, que debería caracterizarse por un diseño que permita una recaudación suficiente de fondos, promueva el cuidado del agua y contribuya a una mayor equidad, estableciendo subsidios cruzados (González et al., 2011).

Por lo que esta investigación permite analizar la relación entre el volumen hídrico requerido para las actividades humanas en un espacio recreativo definido, el cual es un estudio a escala poco analizado y su impacto en un acuífero localizado en una región sometida a presión hídrica, brindando así información que apoye la promoción de patrones responsables para el uso utilización del agua, así como la identificación de oportunidades de ahorro, para mejorar la eficiencia de los dispositivos hidráulicos y disminuir costos asociados al abastecimiento.

1.5 Estructura del documento

La presente tesis está estructurada en cuatro capítulos que facilitan un análisis sistemático de la huella hídrica azul directo vinculada con la afluencia de visitantes al Parque Ecológico Lago de Texcoco (PELT). El primer capítulo ofrece una introducción general que desarrolla el planteamiento del problema, los objetivos, las hipótesis y la justificación de la investigación. El segundo capítulo corresponde a la revisión de literatura, abordando los fundamentos conceptuales de la huella hídrica, con énfasis en la huella hídrica azul y su aplicación en contextos urbanos, turísticos y recreativos. Además, analiza los conceptos de seguridad y sostenibilidad hídrica, y contextualiza la situación hídrica del Valle de México y del acuífero Texcoco. El tercer capítulo desarrolla la evaluación cuantitativa de la huella hídrica azul directa asociada con las visitas al PELT. Se describen el área de estudio, las fuentes de datos y la metodología empleada para la recopilación de información mediante encuestas y la estimación del consumo de agua. Posteriormente, se presentan y discuten los resultados, identificando los principales componentes relacionados con el uso directo del agua durante la permanencia de los visitantes. Finalmente, el cuarto capítulo sintetiza las conclusiones generales, integrando los resultados principales, sus alcances y limitaciones, y proponiendo posibles líneas de investigación que contribuyan a optimizar la gestión y conservación del recurso hídrico en el PELT.

La Figura 1 ilustra de forma esquemática la organización y relación entre los cuatro capítulos que conforman el documento.

Figura 1 Estructura de tesis



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

El presente capítulo expone los principales fundamentos conceptuales y antecedentes que posibilitan el análisis del uso del agua en relación con las actividades humanas, particularmente en lo que respecta a los usuarios de espacios urbanos y recreativos. La revisión parte del concepto de huella hídrica como una herramienta que permite cuantificar la apropiación de los recursos de agua dulce y distinguir sus componentes azul, verde y gris. Para profundizar después en específico en la huella hídrica azul, dada su relación con el aprovechamiento de fuentes superficiales y subterráneas (Hoekstra et al., 2011).

A continuación, se revisa la aplicación de la huella hídrica en contextos urbanos, turísticos y recreativos, donde el consumo de agua está relacionado tanto con la infraestructura y los servicios disponibles como con la cantidad y el comportamiento de los usuarios. La literatura revela que, en estos entornos, el análisis puede llevarse a cabo mediante indicadores que relacionan el volumen de agua utilizado con el número de visitantes, lo que facilita evaluar la intensidad del consumo y realizar comparaciones entre diferentes períodos o actividades (Zhang et al., 2017; Casals Miralles et al., 2023

Sin embargo, ya que la cuantificación del volumen de agua utilizado por sí sola no permite determinar las implicaciones que dicho consumo pueda generar sobre el territorio. La relevancia de la huella hídrica también depende de las condiciones de disponibilidad y presión existentes en la fuente de abastecimiento, en este caso, el acuífero de Texcoco. Por consiguiente, la revisión integra conceptos de seguridad y sostenibilidad hídrica, los cuales facilitan ampliar el análisis hacia las condiciones económicas, sociales, ambientales e institucionales relacionadas con la gestión del recurso, considerando aspectos vinculados con la valoración y los instrumentos económicos aplicados a este recurso, dado que su creciente escasez plantea la necesidad de promover un uso eficiente, sin perder de vista su importancia social y ambiental.

A partir de lo anterior, se lleva a cabo un análisis de las condiciones hídricas de la Cuenca del Valle de México, así como de las características del acuífero

Texcoco, clave 1507, con el fin de comprender las condiciones de la fuente subterránea existente en la región. Esta aproximación facilita la relación entre el consumo de agua, vinculado a actividades humanas y recreativas, y el territorio, el cual enfrenta una elevada presión sobre sus recursos hídricos.

2.1Huella Hídrica

El concepto de huella hídrica (HH) surge como una evolución del enfoque de “agua virtual”, desarrollado por Allan 1998 (Stack Whitney 2018), fue introducido a principios de la década del 2000 como una extensión de la noción de "huella ecológica", con el objetivo de establecer una relación entre los patrones de consumo de bienes y servicios y los flujos de agua necesarios para su producción. Hoestra et al. (2011) definen la huella hídrica como un indicador multidimensional del uso de agua dulce que considera tanto el uso directo como el indirecto asociado a un consumidor o productor. En el caso de los productos, este indicador contempla el volumen de agua utilizado a lo largo de la cadena de suministro y proporciona una perspectiva más amplia sobre la apropiación de los recursos hídricos que aquella basada únicamente en la extracción de agua. Según Ortega Guerra (2023), la huella hídrica puede emplearse como una herramienta analítica que permite establecer la relación entre las actividades humanas y la escasez de este recurso, facilitando la identificación de los sectores con un consumo elevado y la formulación de estrategias para su gestión sostenible.

Este indicador de captación del recurso hídrico tiene tres componentes: 1) huella hídrica azul, la cual se refiere al volumen de agua superficial y subterránea utilizado en un proceso productivo o actividad humana. Este componente resulta especialmente importante en entornos urbanos, donde el abastecimiento depende en gran medida de acuíferos y sistemas de distribución ya que cuantifica el uso consuntivo del agua, es decir, aquella que no retorna a la misma cuenca en las mismas condiciones; 2) huella hídrica verde, hace referencia al agua de lluvia acumulada en el suelo, la cual se emplea principalmente en actividades

agrícolas. Aunque su importancia en entornos urbanos es menor, resulta esencial para comprender el ciclo hidrológico integral y 3) huella hídrica gris, representa la cantidad de agua requerida para diluir contaminantes y garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del recurso hídrico (Arboleda-Tabares et al., 2022) este componente establece una relación directa entre la contaminación y la presión hídrica. La suma de estos tres componentes facilita la evaluación precisa de la huella hídrica total, ofreciendo una perspectiva integral del consumo y uso del recurso hídrico en distintas escalas.

2.1.1Aplicación de la huella hídrica en contextos urbanos.

La huella hídrica urbana (HHU) es una adaptación del concepto general de huella hídrica al análisis de ciudades y sistemas urbanos. Su aplicación permite estudiar la forma en que el agua es utilizada, transformada y redistribuida dentro de espacios caracterizados por una alta concentración de población, infraestructura y actividades económicas (Zapata-Pinedo et al., 2026).

En este contexto, la HHU considera los usos directos del agua asociados con el abastecimiento potable, el consumo doméstico, industrial y sanitario. En zonas urbanas de alta densidad, los componentes azul y gris suelen adquirir mayor relevancia, mientras que la huella verde generalmente tiene una participación menor debido a la limitada presencia de superficies vegetadas y a la menor dependencia del agua de lluvia para cubrir los principales usos urbanos (Zapata-Pinedo et al., 2026).

La metodología para estimar la huella hídrica urbana debe adaptarse a las características particulares de cada ciudad, considerando aspectos como las fuentes de abastecimiento, la infraestructura, la distribución de los usuarios y la conectividad del sistema. Entre 2018 y 2024, este enfoque metodológico se consolidó como una herramienta útil para evaluar la eficiencia en el uso del agua, la dependencia de recursos externos y la seguridad hídrica de los sistemas urbanos (Zapata-Pinedo et al., 2026).

El concepto de huella hídrica se desarrolló principalmente para cuantificar el consumo de agua a nivel nacional y su relación con la producción y el comercio

de productos, especialmente en el sector agrícola. Con la evolución de este enfoque, su utilización se expandió hacia el análisis de las relaciones existentes entre producción, consumo y apropiación de recursos de agua dulce. Esta evolución metodológica permitió trasladar el análisis a diferentes escalas territoriales, incluyendo regiones y áreas urbanas, donde la huella hídrica puede emplearse para comprender de manera más integral las presiones ejercidas por las actividades humanas sobre los recursos hídricos.

En consecuencia, la implementación del análisis de huella hídrica en entornos urbanos posibilita la transición desde una perspectiva centrada exclusivamente en el abastecimiento de agua hacia un enfoque que evalúa la apropiación de recursos hídricos vinculados a las actividades y actores territoriales. En función del objetivo de la investigación, el análisis puede abarcar la totalidad de los flujos hídricos directos e indirectos de la ciudad o centrarse en componentes específicos, como el consumo directo de agua azul asociado a determinados usuarios, infraestructuras o servicios.

La incorporación de la huella hídrica en el análisis de sistemas urbanos es de particular relevancia, dado que las ciudades concentran una proporción significativa del consumo de bienes, energía y servicios, además los recursos naturales necesarios para sostener dichas actividades pueden provenir de territorios ajenos a sus límites administrativos, en este contexto, las urbes actúan como centros de consumo que mantienen relaciones hídricas con otras regiones mediante el intercambio de bienes y servicios. Por tanto, el análisis de la huella hídrica urbana permite evaluar no solo el volumen de agua extraída, distribuida y utilizada directamente en la ciudad, sino también aquella involucrada indirectamente en la producción de bienes y servicios demandados por su población. De esta manera, los flujos físicos de agua y los flujos de agua virtual se consideran componentes de un sistema que abarca las dinámicas de abastecimiento, consumo y actividad económica en contextos urbanos (Paterson et al., 2015).

Así la huella hídrica posibilita distinguir entre el uso directo e indirecto del recurso hídrico, ampliando el análisis que generalmente se realiza mediante indicadores de abastecimiento urbano, que suelen centrarse en el volumen de agua ingresado a las redes de suministro. Esta ampliación es significativa, ya que el consumo urbano puede generar presiones sobre los recursos hídricos tanto dentro como fuera del territorio donde se realiza el consumo, Ahams et al. (2017) identificaron diferencias sustanciales en la huella hídrica asociada al consumo entre diversas ciudades y regiones de Estados Unidos, las cuales están relacionadas con sus características productivas, patrones de consumo y relaciones comerciales, indicando en sus resultados que la huella hídrica urbana no debe entenderse únicamente como una medida del volumen de agua utilizado localmente, sino también como una herramienta para detectar la dependencia de las ciudades respecto a recursos hídricos provenientes de otros territorios y las presiones que sus patrones de consumo pueden ejercer sobre ellos.

La utilidad de este enfoque resulta especialmente relevante en ciudades y regiones que enfrentan condiciones de escasez o presión sobre sus recursos hídricos. En el caso de Beijing, Ma et al. (2015) evaluaron la sostenibilidad del uso del agua mediante el cálculo de la huella hídrica, considerando tanto el consumo de agua local como el agua virtual incorporada en bienes y servicios consumidos. Los autores señalan que este método complementa los indicadores tradicionales basados en extracciones de agua, ofreciendo una visión más amplia sobre la apropiación de recursos de agua dulce por parte de una megaciudad. Por consiguiente, la huella hídrica puede servir como herramienta para identificar las presiones derivadas del consumo urbano y para apoyar decisiones orientadas a una gestión más sostenible del recurso (Ma et al., 2015).

Además, la aplicación de la huella hídrica en contextos urbanos puede abordarse a diferentes escalas y componentes de la actividad económica. Utilizando modelos de insumo-producto, Han et al. (2014) analizaron el agua incorporada en las actividades económicas y en el consumo de los hogares en Beijing, hallando que una proporción significativa del agua relacionada con la demanda

final correspondía al consumo domiciliario. Asimismo, los flujos comerciales permitían que parte de las necesidades de consumo de la ciudad fueran satisfechas mediante recursos hídricos utilizados en otras regiones. Estos resultados evidencian que la presión sobre los recursos hídricos no depende únicamente de la cantidad de agua utilizada directamente en una ciudad, sino también de su estructura económica, los patrones de consumo y las relaciones comerciales que satisfacen esa demanda. En consecuencia, las estrategias para reducir estas presiones pueden enfocarse no solo en mejorar la eficiencia del uso del agua, sino también en modificar los patrones de consumo y la estructura económica (Han et al., 2014).

2.1.2 Casos de estudio de huella hídrica en turismo y recreación.

La evaluación de la huella hídrica aplicada especialmente en entornos urbanos y recreativos permite un análisis detallado de los requerimientos de agua asociados tanto a la operación de dichos espacios como a los servicios ofrecidos a los visitantes. En estos espacios, los recursos hídricos se destinan a diversos fines, incluyendo el consumo directo por parte de los usuarios, el funcionamiento de sistemas sanitarios, tareas de limpieza y mantenimiento, el riego de áreas verdes y la ejecución de actividades recreativas específicas. Por ende, el volumen de agua necesario está condicionado por las características particulares de cada sitio, su infraestructura y los servicios proporcionados.La literatura sobre turismo muestra que el consumo directo se encuentra estrechamente relacionado con los servicios utilizados por los visitantes y con la infraestructura disponible en el sitio. Así como también presenta variaciones temporales en función de la dinámica de uso y operación de dichos espacios (Gössling et al., 2012; Casals Miralles et al., 2023). Esta variación a lo largo del tiempo adquiere especial relevancia en los espacios recreativos, debido a que la demanda ejercida sobre los recursos hídricos no está determinada únicamente por la población que reside en la zona o por el personal que permanece de manera habitual en el sitio, sino también por el número de visitantes y los periodos en los que se concentra su afluencia.

En este contexto, la relación entre el número de visitantes y el consumo de agua puede analizarse mediante indicadores que permitan comparar distintos espacios y actividades. La revisión desarrollada por Casals Miralles et al. (2023) señala que los estudios de huella hídrica aplicados al turismo emplean con frecuencia unidades expresadas por turista y día, lo que facilita la comparación del consumo hídrico entre diferentes destinos y actividades turísticas. Asimismo, los autores indican que el agua utilizada directamente por los visitantes corresponde principalmente a agua azul de origen local, por lo que su consumo se encuentra estrechamente relacionado con la disponibilidad de los recursos hídricos del sitio donde se desarrolla la actividad.

Esta relación adquiere mayor relevancia cuando las actividades turísticas y recreativas se desarrollan en regiones con disponibilidad limitada de agua dulce. Al igual que otras actividades económicas, el turismo ejerce diferentes presiones sobre el ambiente, entre ellas la demanda de agua necesaria para atender a los visitantes y mantener los servicios e instalaciones asociados. Cuando una elevada afluencia de personas coincide con condiciones de escasez hídrica, el aumento de la demanda puede disminuir la disponibilidad de agua por habitante y generar una mayor presión sobre las fuentes locales. En estas circunstancias, el aprovechamiento del recurso puede generar competencia entre los diferentes usuarios y sectores que dependen de una misma fuente de abastecimiento, como la población residente, los visitantes, el sector agrícola y las regiones involucradas en el suministro o transferencia de agua (Casals Miralles et al., 2023).

La presión que las actividades turísticas y recreativas ejercen sobre los recursos hídricos debe analizarse considerando las condiciones particulares del territorio donde se desarrollan. En este sentido, la escasez de agua puede entenderse como un desequilibrio entre el suministro disponible y la demanda de agua dulce en un área determinada, bajo determinadas condiciones institucionales y de infraestructura (FAO, 2013). Esta situación puede manifestarse mediante una demanda insatisfecha, una mayor competencia entre usuarios, la

sobreexplotación de las aguas subterráneas o la existencia de flujos insuficientes para el entorno natural. A su vez, la demanda hídrica presenta diferencias entre regiones debido a factores relacionados con el nivel de desarrollo, los valores sociales y los patrones de comportamiento de la población (Molle & Mollinga, 2003). Estas diferencias ponen de manifiesto la importancia de que la gestión de los recursos hídricos considere las características y presiones específicas de cada contexto local.

En este sentido, la actividad turística puede interpretarse como un incremento temporal de la población dentro de un territorio determinado, cuya magnitud y duración dependen de la cantidad de visitantes y de su permanencia en el sitio. Desde una perspectiva ambiental, este aumento adquiere relevancia debido a que los patrones de consumo de los turistas pueden generar una presión mayor sobre los recursos disponibles en comparación con los asociados a la población residente. Por ello, la concentración de visitantes en determinados periodos puede incrementar temporalmente la demanda de agua y ejercer una presión adicional sobre las fuentes locales de abastecimiento (Hadjikakou et al., 2013)

En consecuencia, para el análisis de un parque o espacio recreativo resulta conveniente diferenciar entre el volumen total de agua azul utilizado por el sitio y la intensidad de uso asociada con sus visitantes. El primero puede expresarse, por ejemplo, en m³/año, mientras que el segundo puede normalizarse respecto al número de usuarios:

$$I_{agua} = \frac{V_{\text{agua azul directa}}}{N_{\text{visitantes}}}$$

y expresarse como:

$$L/\text{visitante}$$

o:

$$m^3/\text{visitante}$$

El uso de indicadores normalizados por visitante es consistente con los estudios de turismo que expresan el consumo o la huella hídrica en unidades por turista y día, ya que facilita comparar periodos con diferente afluencia y determinar si los cambios en el consumo responden al aumento de visitantes o a modificaciones en la eficiencia del uso del agua (Casals Miralles et al., 2023; Zhang et al., 2017), como se observa en Zhang et al. (2017), un estudio sobre la huella hídrica del turismo en Mount Huangshan, China, estimaron tanto el volumen total anual como valores normalizados por turista.

La literatura reciente sobre huella ambiental del turismo también señala que la normalización de los resultados por turista o por unidad temporal facilita las comparaciones entre destinos y actividades, aunque los límites metodológicos deben definirse claramente (Zhang et al., 2017; Casals Miralles et al., 2023).

Hoekstra et al. (2012) destaca además que la evaluación de la huella hídrica azul resulta más relevante cuando el volumen de agua consumido se analiza en función de la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca, considerando además los requerimientos de agua necesarios para mantener las condiciones ambientales. Aunque existe una literatura amplia sobre huella hídrica en agricultura, ciudades y turismo, son menos frecuentes los estudios que cuantifican la huella hídrica azul directa asociada específicamente con los usuarios de espacios recreativos urbanos y que, además, relacionan dicho consumo con la condición hidrogeológica de un acuífero deficitario.

2.1.3 Cálculo de huella hídrica azul directo para uso domestico

Cervantes Carretero et al. (2017) señalan que con el propósito de fortalecer la gestión integrada y sostenible del recurso hídrico para abordar los desafíos que enfrenta el sector en México, se establecieron las Reglas que contienen la metodología para calcular el volumen de uso eficiente de las aguas nacionales. Estas directrices también buscan promover el uso eficiente en los sectores agrícola y público urbano. La metodología para determinar la huella hídrica (HH)

destinada al uso doméstico dependerá de la información disponible, la cual puede fundamentarse en datos de micro medición y macro medición.

Para determinar la huella hidrica asociadas al uso del inodoro, es necesario disponer de información referente al tipo de inodoro instalado, ya sea de bajo consumo, que opera con volúmenes de seis litros o menos por descarga, o convencional, que utiliza volúmenes iguales o superiores a dieciséis litros por descarga. Posteriormente, esta información se multiplica por la frecuencia de utilización del inodoro durante un día. (Ortega Guerra, 2023)

Ejemplo del cálculo de huella hídrica en caso de ciudad

Cervantes Carretero et al. (2017) muestra un ejemplo del calculo de HH en el que se realizó la estimación de la Huella Hídrica del uso doméstico en la Zona Metropolitana de Mérida, Yucatán, basada en el número de habitantes. Para calcular la HH promedio por persona, según el tipo de usuario, consultaron la página web de la Water Footprint Network, donde se analizaron los consumos de agua correspondientes a cada perfil de usuario. Dado que el estudio se centró en la determinación de la Huella Hídrica Azul directa, no se incluyeron las variables relacionadas con el “Consumo de comida”, las cuales son relevantes para el cálculo de la Huella Hídrica total, considerando además la HH Azul indirecta, la HH Verde y la HH Gris. Finalmente, se utilizó la siguiente fórmula:

- HH = HH promedio por habitante × número de habitantes

De esta manera, se obtuvo que la Huella Hídrica del uso doméstico en Mérida es de 246.64 hm³ anuales, reflejado en el cuadro 1.

Cuadro 1 HH por tipo de usuario en México

Tipo de usuario	Clase económica	HH promedio (m³/año/hab)	Núm. de habitantes	HH promedio (m³/año)
Doméstico Zona 1	Baja	127	601 960	76 448 920
Doméstico Zona 2	Media	223	496 904	110 809 592
Doméstico Zona 3	Alta	488	121 684	59 381 792
Doméstico Marginal	Marginal	23	20	460
Total		861	1 220 568	246 640 764

FUENTE: Cervantes Carretero et al. (2017)

La huella hídrica azul directa permite cuantificar la cantidad de agua utilizada en diversas actividades. No obstante, como ya se ha mencionado contar únicamente con este dato no resulta suficiente para comprender plenamente las implicaciones del consumo, ya que también es fundamental analizar las condiciones de disponibilidad del recurso en el lugar de utilización. En este sentido, Hoekstra et al. (2012) destacan que el análisis de la huella hídrica azul cobra mayor relevancia cuando se relaciona con la disponibilidad de agua azul en la cuenca y con las necesidades ambientales.

Por ello, el estudio del consumo de agua debe considerar las condiciones del recurso y la capacidad de mantener su disponibilidad a lo largo del tiempo, a partir de esta perspectiva, resulta imprescindible abordar el concepto de seguridad hídrica, que engloba aspectos como la disponibilidad, el acceso y la calidad del agua, así como las condiciones necesarias para su uso y gestión sostenibles.

2.2 Seguridad hídrica

La ONU propone la siguiente definición de seguridad hídrica:

“La capacidad de una población para salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas y de calidad aceptable de agua para el sustento de las personas, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, para garantizar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con el agua, y para preservar los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política.” (ONU-Water, 2013, p. 1, traducción propia)

Según la CEPAL (2016), el análisis de la gestión de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe debe ir más allá de una visión convencional centrada únicamente en la disponibilidad física del agua, e incorporar las dinámicas estructurales que condicionan su demanda y uso, debido a que está profundamente influenciada por las transformaciones sociales, económicas y territoriales que han caracterizado a la región en las últimas décadas, en este contexto, procesos como el crecimiento demográfico, la urbanización acelerada, la expansión de actividades productivas y los cambios en los patrones de consumo han incrementado la presión sobre los sistemas hídricos, generando

escenarios cada vez más complejos para su gestión y planificación (Castán Aquino, 2018). Por su parte la Organización de las Naciones Unidas advierte que la escasez de agua no debe considerarse únicamente como un fenómeno físico, sino como un resultado de la interacción de diversos factores, entre los que destacan el desequilibrio entre oferta y demanda, el deterioro o insuficiencia de la infraestructura hídrica y las limitaciones institucionales para garantizar una distribución equitativa y eficiente del recurso.

La escasez hídrica debe entenderse como un fenómeno relativo y dinámico, que se agudiza por el incremento sostenido en la demanda y la disminución en la cantidad y calidad del agua disponible, situación que se acentúa en países donde los sistemas de abastecimiento y gestión no logran responder adecuadamente a las necesidades de la población. Por tanto, la problemática del agua refleja no solo la finitud del recurso, sino también las deficiencias en los modelos de gobernanza, inversión y planificación. Esto subraya la importancia de adoptar enfoques integrales que articulen dimensiones económicas, sociales, ambientales e institucionales, con el fin de garantizar una gestión sostenible y equitativa del agua a largo plazo (ONU, 2026).

Según los hidrólogos la escasez de agua puede ser evaluada en función de la relación entre agua y población, deduciendo que aproximadamente una quinta parte de la población mundial vive en zonas con déficit hídrico y otra en condiciones similares, especialmente en los países que carecen de una infraestructura adecuada para el transporte de agua desde ríos y acuíferos; aunque en el planeta existe suficiente agua potable para satisfacer las necesidades de la población, su distribución es irregular, se desperdicia, se contamina y su gestión no es sostenible (Perea Bello, G. 2013).

La seguridad hídrica permite evaluar las condiciones necesarias para que una población tenga acceso al agua en cantidad y calidad adecuadas, considerando además los diversos factores que pueden influir en su disponibilidad. No obstante, además de asegurar el acceso al recurso, es fundamental analizar la forma en que el agua es utilizada y gestionada para prevenir que su

aprovechamiento actual impida su disponibilidad futura. En este sentido, la seguridad hídrica se vincula con la sostenibilidad hídrica, ya que ambas buscan mantener las condiciones necesarias para satisfacer las necesidades de la población, garantizando al mismo tiempo la conservación de las fuentes de agua y de los ecosistemas que de ellas dependen.

2.3 Sostenibilidad hídrica

El incremento en la población, la expansión de la producción alimentaria y el desarrollo industrial, junto con la mejora de los niveles de vida, están generando una mayor demanda de recursos hídricos además del cambio climático y la contaminación ambiental que impactan negativamente en la disponibilidad de estos recursos, dificultando su adecuada gestión para atender las necesidades crecientes (Rathnayaka et al., 2016).

El uso sostenible de los recursos hídricos es esencial para prevenir problemáticas económicas, ambientales y sociales. Por ello, resulta fundamental integrar fuentes alternativas, gestionar eficientemente la demanda y garantizar la sostenibilidad de todas las fuentes de agua. A nivel global, la concentración de la población en áreas urbanas ha aumentado, haciendo cada vez más complejo y costoso el suministro de servicios básicos como energía, agua y alimentos. En el caso del agua, la situación es particularmente preocupante, ya que, en un contexto de urbanización y crecimiento económico, la distribución de este recurso no es equitativa. La provisión de agua se ve afectada tanto por el aumento de la demanda como por la reducción en la disponibilidad del recurso, la cual en parte está condicionada por el crecimiento territorial de las ciudades, que limita la recarga de los mantos acuíferos (ONU-Agua, 2013). Es importante destacar que los desafíos relacionados con el suministro de agua varían en función del tamaño y la forma de las ciudades (Jiménez-Cisneros, B. 2014) por lo que el desafío principal es asegurar un suministro de agua continuo y confiable, minimizando costos sociales, ambientales y energéticos, mediante una gestión sostenible y eficiente de los recursos hídricos, no obstante, la sostenibilidad hídrica implica un cambio ético y filosófico en relación con nuestra percepción de la necesidad y la

responsabilidad hacia la preservación de un recurso limitado (Castán Aquino, 2018).

Leff, E. (2010) señala que la conducta humana no es solo una respuesta al entorno, sino que parte también de la conciencia que puede guiar a acciones y a la evolución social hacia la libertad aprovechando la creatividad natural, además la moral natural podría unificar a la humanidad en una transformación revolucionaria. Sin embargo, los controles ideológicos, tecnológicos y económicos dificultan integrar las condiciones ecológicas, la justicia social y la democracia en nuevas formas de organización, impidiendo el surgimiento de una conciencia y estrategias de poder que transformen el orden actual.

De acuerdo con O'Connor (2006), la sostenibilidad puede entenderse como la coevolución de los sistemas económicos, sociales y ambientales, planteamiento que retoma el concepto de *triple bottom line* desarrollado por John Elkington en 1994. No obstante, dado que estos sistemas son interdependientes, se generan presiones (exigencias) respecto al papel que cada uno debe desempeñar en relación con los demás. Estas presiones pueden ser en ocasiones, contradictorias o incompatibles, lo que da lugar a un cuarto sistema compuesto por: la política, normas y marcos institucionales encargados de regular las esferas económica y social, y, de manera indirecta, la ambiental. Los análisis destinados a la sostenibilidad deben enfocarse en las interfaces, interacciones y dependencias entre estos sistemas, atendiendo a los principios de derecho, respeto y responsabilidad que rigen la relación entre una esfera y otra (O'Connor, M, 2006).

La eficiencia en la gestión del agua no debe limitarse a consideraciones técnicas; más bien, debe conceptualizarse como un proceso integral que integra políticas públicas, infraestructura, equidad social y sostenibilidad. Este enfoque está estrechamente vinculado al diseño institucional y a los sistemas tarifarios, con el objetivo de conciliar el reconocimiento del agua como un derecho humano fundamental con su adecuada valoración económica. (Bautista, N.,2014).

Es importante destacar que, dentro del concepto de sostenibilidad hídrica, las decisiones relacionadas con la infraestructura hídrica en las zonas urbanas suelen estar influenciadas tanto por factores políticos como por ciertas limitaciones físicas. (Rygaard et al., 2011).

Desde la década de 1980, enfoques como la economía ecológica y la evaluación ambiental integrada han facilitado el análisis de la relación entre la economía y el medio ambiente, reconociendo que el desarrollo debe garantizar la conservación de los sistemas ecológicos que lo sustentan. Por su parte la gobernanza busca impulsar un equilibrio entre el bienestar económico y la sostenibilidad ecológica, generalmente a través de la formulación de políticas, aunque esta relación suele ser de carácter indirecto (O'Connor, M, 2006).

La sostenibilidad en la gestión del agua puede entenderse como el resultado de la interacción entre las dimensiones económica, social y de gobernanza, especialmente en entornos urbanos donde la presión sobre los recursos hídricos es más significativa. Desde la perspectiva económica, resulta prioritario satisfacer las necesidades humanas sin exceder los límites ecológicos establecidos, lo que implica no solo asegurar el abastecimiento, sino también implementar esquemas eficientes en términos energéticos y de utilización de recursos, considerando todo el sistema de suministro, tratamiento y distribución del agua. Esta visión reconoce que el agua no es simplemente un insumo para la producción, sino un recurso estratégico cuya gestión ineficiente puede generar costos ambientales y económicos crecientes. Por otro lado, la dimensión social abarca aspectos fundamentales como la identidad colectiva, los valores culturales asociados al agua y el grado de aceptación de las políticas hídricas por parte de los usuarios. Además, destaca la importancia de la organización social en torno a su gestión y la promoción de una educación que fomente prácticas sostenibles. Sin embargo, también pone en evidencia desigualdades territoriales profundas, ya que frecuentemente los beneficios ambientales y sanitarios de las zonas urbanas se mantienen a costa de transferir riesgos hacia las periferias y áreas rurales, donde suelen concentrarse impactos negativos como la sobreexplotación de acuíferos

y la degradación ambiental, generando problemáticas de justicia ambiental y una limitada conciencia pública sobre estos procesos (Delgado-Ramos & Guibrunet, 2017).

Asimismo, las estrategias tradicionales de abastecimiento, que a menudo dependen de la importación de agua desde otras cuencas para satisfacer la demanda urbana, en un contexto de creciente déficit hídrico, han intensificado los conflictos sociales y políticos relacionados con la distribución, el acceso y el control del recurso (Escolero et al., 2012).

En este marco, la dimensión de gobernanza adquiere un papel fundamental, ya que permite gestionar estas tensiones mediante el diseño e implementación de arreglos institucionales adecuados.

“La gobernanza del agua comprende los sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos establecidos para desarrollar y gestionar los recursos hídricos y prestar servicios de agua en los diferentes niveles de la sociedad” (Rogers & Hall, 2003, p. 7, traducción propia).

Una gobernanza efectiva implica no solo la coordinación entre actores e instituciones, sino también la incorporación de criterios de equidad, eficiencia y sostenibilidad que permitan abordar los desafíos actuales del agua desde una perspectiva integral. El objetivo es lograr un sistema de gobernanza participativo, cada vez más inclusivo y responsable (Patterson et al., 2016).

Los asentamientos urbanos, como principales consumidores de energía y materiales en los proceso os asentamientos urbanos, como principales consumidores de energía y materiales en los procesos sociales y económicos, generan una creciente demanda de recursos que, en contextos territoriales específicos, produce diversos impactos socio ecológicos que ponen en riesgo la sostenibilidad. En este sentido, la sostenibilidad urbana puede definirse como el logro de un equilibrio entre el desarrollo urbano y la protección ambiental a largo plazo, integrando además dimensiones de inclusión social, equidad económica, diversidad cultural y participación democrática (Delgado-Ramos & Guibrunet,

2017). Por ello, tanto la sostenibilidad como la resiliencia urbana han adquirido una relevancia creciente en los ámbitos académicos y políticos. Este marco resulta especialmente pertinente en el caso del área metropolitana de la Ciudad de México, uno de los mayores aglomerados urbanos de los 10 más grandes del mundo (Enciclopedia Britannica, 2026), cuya expansión – que comprende las 16 municipios de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y 21 del Estado de Hidalgo – ha agravado problemáticas como el aumento del transporte motorizado y la presión sobre áreas naturales protegidas que concentran importante cantidad de servicios ecosistémicos. También, aunque se han promovido acciones de bajo costo orientadas a mejorar la eficiencia hídrica, como la captación de agua de lluvia y el uso de energía solar, persisten limitaciones estructurales significativas: la infraestructura hídrica resulta insuficiente y obsoleta, con pérdidas cercanas al 41% por fugas. No obstante, su renovación representa una oportunidad clave para reducir desigualdades en el acceso, la calidad y la continuidad del servicio, así como para avanzar hacia esquemas tarifarios más justos y equitativos que garanticen el derecho humano al agua y al saneamiento (Delgado-Ramos, GC, & Guibrunet, L. 2017).

En este contexto, la privatización del agua ha adoptado diversas formas, destacándose la producción y comercialización de agua embotellada, así como la participación privada en los servicios relacionados con el recurso hídrico. Aunque el mercado del agua embotellada ha experimentado una expansión significativa, los resultados de la privatización de los servicios hídricos han sido diversos. Estos servicios incluyen actividades esenciales como el abastecimiento urbano, la administración, distribución, mantenimiento, operación y cobro de los servicios, además del tratamiento y la reutilización de aguas residuales industriales. Este último ámbito se ha convertido en uno de los sectores más atractivos para la inversión privada, en gran medida debido al respaldo estatal y a las políticas impulsadas por organismos internacionales que promueven soluciones orientadas al mercado frente a la crisis hídrica.

El agua y sus sistemas de aprovechamiento, tradicionalmente gestionados como asuntos de interés público por las comunidades y, posteriormente, por los gobiernos, han sido paulatinamente incorporados a dinámicas de mercantilización que desde perspectivas críticas vinculadas a la Ecología Política y a la Economía Ecológica, diversos autores sostienen que estos procesos pueden profundizar las desigualdades socioambientales y generar nuevas tensiones en torno al acceso y control del recurso, sin que necesariamente aborden las causas estructurales de la crisis hídrica (Kaika, 2006) La mercantilización del agua, poniendo tarifas y formas de pago, buscaba que las personas usaran el agua de manera más cuidadosa y eficiente, dándole un valor económico. En algunos casos, esto ayudó a reducir el uso excesivo y a obtener recursos para mantener los sistemas de agua. Pero los resultados no fueron iguales para todos. Las personas con menos recursos encontraron más difícil acceder al agua, mientras que las grandes empresas o grandes consumidores pudieron seguir usando mucho más. Además, aunque las tarifas ayudaron a gastar el agua de forma más responsable, no solucionaron problemas fundamentales como el agotamiento de los pozos subterráneos, las fugas en las tuberías, la contaminación y los problemas en la gestión del agua. Por eso, muchas voces consideran que la crisis del agua no puede resolverse solo con mecanismos del mercado, sino a través de modelos de gobernanza que integren eficiencia, sostenibilidad y equidad social (Kaika, 2006).

En este sentido, la mercantilización del agua introduce lógicas centradas en la rentabilidad económica y en la valorización del recurso, mientras que propuestas como la ciudad-cuenca plantean una reconfiguración de la relación entre el espacio urbano y los sistemas hidrológicos. Bajo esta perspectiva, el concepto de ciudad-cuenca implica considerar a la ciudad como parte integral de una cuenca hidrográfica, donde el desarrollo urbano debe planificarse en armonía con el ciclo del agua, la topografía y los ecosistemas circundantes, reconociendo la interdependencia entre los procesos urbanos, ambientales y territoriales (Peña, R. J. 2012).

La preocupación acerca de que el agua se convierta en una mercancía ha emergido como una respuesta significativa frente a los procesos de privatización y comercialización de los sistemas de abastecimiento. Desde esta perspectiva, su importancia para satisfacer las necesidades básicas de la población hace necesario que su gestión no responda exclusivamente a criterios de mercado. Sin embargo, en la práctica, una parte de la población con menores recursos obtiene el agua mediante mercados informales en los que los precios pueden representar una limitante para su acceso (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2006).

En México, la gestión del agua requiere considerar tanto su dimensión social como económica. Desde una perspectiva social, el acceso al agua se relaciona con el reconocimiento del recurso como un derecho humano y con la necesidad de garantizar condiciones de equidad y no discriminación. Al mismo tiempo, su gestión involucra aspectos económicos relacionados con los costos, las tarifas y la asequibilidad del servicio, por lo que ambas dimensiones deben ser consideradas en el análisis de las políticas de acceso al agua (Jiménez Cisneros et al., 2011).

Los elementos previamente señalados evidencian que la sostenibilidad hídrica no depende exclusivamente de reducir el consumo de agua, sino también de las condiciones ambientales, sociales y económicas que influyen en su aprovechamiento y gestión. Por ello, el análisis de la sostenibilidad debe considerar las particularidades del territorio, dado que la disponibilidad de recursos hídricos, las fuentes de abastecimiento y la presión ejercida sobre ellas pueden variar significativamente entre distintas regiones.

En este contexto, para evaluar la huella hídrica azul asociada a los usuarios del Parque Ecológico del Lago de Texcoco, el cual forma parte de la cuenca del Valle de México, las condiciones de disponibilidad y uso del agua en esta región son elementos clave para interpretar adecuadamente el consumo estimado presentado en la investigación.

A continuación, en el siguiente apartado, se detallan las principales características de las condiciones hídricas de la cuenca del Valle de México.

2.4 Condiciones hídricas en la cuenca del valle de México

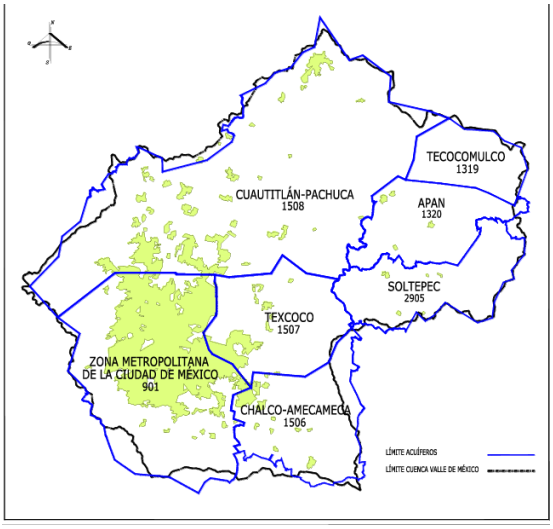
De acuerdo con Peña Díaz (2019), Para administrar los recursos hídricos, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) divide la cuenca del Valle de México en siete zonas para las aguas superficiales y otras siete para las aguas subterráneas (Cuadro 2) cuya división geográfica se muestra en la Figura 2 y Figura 3.

Cuadro 2 Zonas administrativas en materia de recursos hídricos

Clave acuífero	Nombre del acuífero	Área (km^2)	Sub-Cuenca hidrológica	Nombre de la cuenca	Área (km^2)
Aguas subterráneas			**Aguas superficiales**		
901	Zona Metropolitana de la Ciudad de México	1,900	I	Xochimilco	508
1319	Tecocomulco	564	II	Río La Compañía	1,167
1320	Apan	733	III	Tochac-Tecocomulco	1,328
1506	Chalco-Amecameca	1,393	IV	Río de las Avenidas de Pachuca	2,647
1507	Texcoco	934	V	Texcoco	1,399
1508	Cuautitlán-Pachuca	3,870	VI	Ciudad de México	1,816
2902	Soltepec	429	VII	Río Cuautitlán	832
Suma Cuenca del Valle de México		**9,823**	**Suma Cuenca del Valle de México**		**9,698**

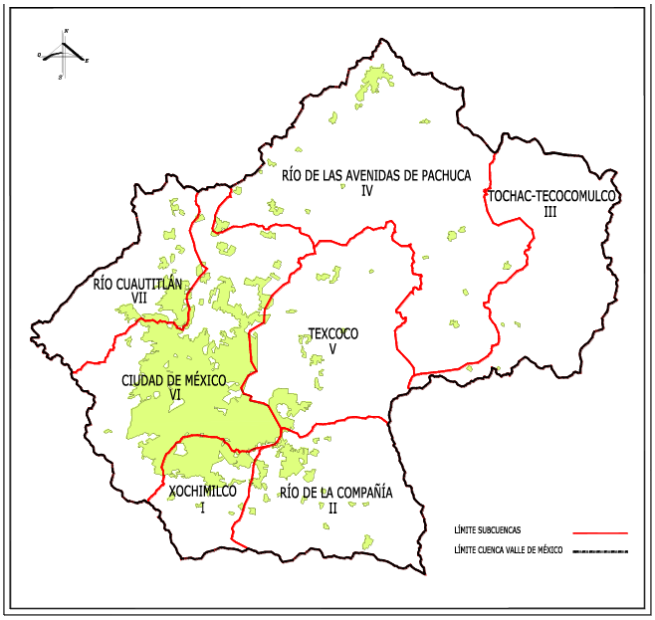
Fuente: Peña-Díaz, S. (2019). Condiciones hídricas en la cuenca del Valle de México. Tecnología y Ciencias del Agua.

Figura 2 Zonas administrativas en materia de aguas del subsuelo (acuíferos)



Fuente: Peña-Díaz, S. (2019). Condiciones hídricas en la cuenca del Valle de México. Tecnología y Ciencias del Agua.

Figura 3 Zonas administrativas en materia de aguas superficiales (cuencas)



Fuente: Peña-Díaz, S. (2019). Condiciones hídricas en la cuenca del Valle de México. Tecnología y Ciencias del Agua.

El acuífero Texcoco, clave 1507, se localiza en el Estado de México y pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. La información sobre su disponibilidad media anual de agua subterránea fue publicada el 4 de enero de 2018 en el *Diario Oficial de la Federación*, como parte de la actualización de la disponibilidad de los 653 acuíferos del territorio nacional, destacando que el desarrollo histórico y económico del Valle de México ha tenido un papel fundamental en el país, dado su alto nivel de industrialización y población (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018). En cuanto al uso del agua subterránea en este acuífero, el principal destino es el consumo urbano, representando aproximadamente el 70% del volumen total extraído. Esta proporción refleja la elevada demanda de agua para servicios públicos en las comunidades aledañas, según datos publicados en el Diario Oficial de la Federación en 2015 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2015,). Esta situación ha incrementado de manera considerable la demanda de agua en diversas áreas de la Cuenca de México, lo que en las últimas tres décadas ha provocado un aumento sostenido en las extracciones de agua subterránea, como resultado, se ha registrado un incremento en los volúmenes extraídos y una alteración en el equilibrio del sistema hidrológico natural de la región (CONAGUA, 2018).

De acuerdo con Peña (2019), los censos de aprovechamientos de aguas subterráneas realizados por la Conagua-Ocavm en condiciones consideradas alrededor del año 2015 indican que la extracción bruta de agua subterránea asciende a aproximadamente 1,736 hm^3 anuales. De esta cifra, el 87% corresponde al uso público urbano, considerando usos públicos urbanos que abarcan servicios, actividades comerciales, industriales, pérdidas en la red de distribución y, en general, la satisfacción de todas las demandas de la población, mientras que el 13% restante se distribuye entre los demás usos agrícola, industrial y de servicios (Cuadro 3).

Cuadro 3 Volúmenes brutos usados de agua subterránea (hm3/año)

	Agrícola	Público Urbano	Industrial	Otros	Suma
ZMCM	1	559	64	1	625
Cuautitlán-Pachuca	45	687	16	4	752
Texcoco	47	130	4	2	183
Chalco-Amecameca	16	108	4	1	129
Apan	1	12	0	2	15
Tecocomulco	0	12	1	0	13
Soltepec	13	5	1	0	19
Total	**123**	**1,513**	**90**	**10**	**1,736**

Fuente: Peña-Díaz, S. (2019). Condiciones hídricas en la cuenca del Valle de México. Tecnología y Ciencias del Agua.

Al comparar los datos previamente presentados por Peña (2019) con la información más actualizada publicada en el Diario Oficial de la Federación en 2023 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023, 9 de noviembre), se evidencian diferencias significativas entre los acuíferos que conforman la cuenca, que son particularmente críticas en cuatro de los principales acuíferos de la Cuenca del Valle de México, en concordancia con el análisis realizado por Peña Díaz.

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México presenta una disponibilidad media anual negativa de 480.43 hm³/año, seguida por Cuautitlán-Pachuca con -229.94 hm³/año, Texcoco con -149.81 hm³/año y Chalco-Amecameca con -35.99 hm³/año. Los acuíferos de Tecocomulco, Apan y Soltepec muestran disponibilidades positivas de 17.34, 2.76 y 23.53 hm³/año, respectivamente (ver cuadro 4). Son los acuíferos con mayor disponibilidad negativa, precisamente los que también cuentan con las zonas en las que se concentra la mayor parte de la población y de las actividades económicas de la Cuenca del Valle de México (Peña Díaz, 2019). Las localidades más pobladas dentro de los límites del acuífero Texcoco, clave 1507, son Ciudad Nezahualcóyotl, con una población de aproximadamente 1,101,585 habitantes; Chimalhuacán, con 612,383 habitantes;

Chicoloapan de Juárez, con 172,919 habitantes; y Texcoco de Mora, con 105,165 habitantes (CONAGUA, 2018)

Cuadro 4 Disponibilidad del acuífero correspondiente a la zona administrativa XIII

REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA	ENTIDAD FEDERATIVA	Clave	Acuifero	R	DNC	VEAS				DMA	
						VCAS	VEALA	VAPTYR	VAPRH	POSITIVA	NEGATIVA (DÉFICIT)
XIII AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO	CIUDAD DE MÉXICO	901	ZONA METROPOLITANA DE LA CD. DE MÉXICO	512.8	0	979.762196	0	1.7098	11.757919	0	-480.429914
	HIDALGO	1308	EL ASTILLERO	3.1	0	0.038982	0.662091	0	0.023124	2.375803	0
	HIDALGO	1309	CHAPANTONGO-ALFAJAYUCAN	136.9	112.9	5.443209	3.763321	0.197581	0.942297	13.653503	0
	HIDALGO	1310	VALLE DEL MEZQUITAL	515	293	167.952024	12.138701	6.494807	4.951725	30.462743	0
	HIDALGO	1311	AJACUBA	25.7	15.6	2.459013	0.07012	2.592967	0.065127	4.912774	0
	HIDALGO	1312	IXMIQUILPAN	150.1	124.6	4.270279	1.944673	3.758604	2.818694	12.70945	0
	HIDALGO	1313	ACTOPAN-SANTIAGO DE ANAYA	208.1	90	48.492584	4.276877	10.304154	1.882292	53.144093	0
	HIDALGO	1316	TEPEJI DEL RÍO	46.3	35.2	8.335828	5.440523	0.91738	0.660735	0	-4.254466
	HIDALGO	1319	TECOCOMULCO	27.8	0.5	3.109183	0	6.62913	0.217331	17.344356	0
	HIDALGO	1320	APAN	30.3	0	27.053197	0	0	0.490411	2.756391	0
	ESTADO DE MÉXICO	1506	CHALCO-AMECAMECA	74	0	102.570449	0	0.240103	7.182987	0	-35.993539
	ESTADO DE MÉXICO	1507	TEXCOCO	145.1	10.4	273.404707	0	0	11.100417	0	-149.805124
	ESTADO DE MÉXICO	1508	CUAUTITLÁN-PACHUCA	356.7	0	551.075938	0	9.163608	26.403093	0	-229.942637
	TLAXCALA	2902	SOLTEPEC	57	16.2	16.717709	0	0.17658	0.378942	23.526769	0

Fuente: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2023, 9 de noviembre)

[La disponibilidad media anual (DMA) se obtiene de la diferencia entre la recarga total media anual (R), la descarga natural comprometida (DNC) y el volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).]

Los datos de la actualización de 2023 presentados en la tabla anterior confirman la persistencia de una significativa presión sobre los acuíferos que abastecen las principales zonas urbanas de la cuenca. Esta situación es particularmente relevante dada la alta dependencia regional del recurso hídrico subterráneo, lo que genera una disponibilidad negativa que restringe la ampliación legal de las extracciones y además subraya la necesidad de fortalecer las estrategias de gestión de la demanda, reducir las pérdidas, promover el reúso del agua y potenciar la recarga artificial de los acuíferos en territorio mexicano.

El acuífero de Texcoco presenta una condición crítica, dado que dado que su recarga total media anual es de 145.1 hm³/año. De esta cifra, 10.4 hm³/año corresponden a descarga natural comprometida, su Volumen de Extracción Admitido por Sistema (VEAS) es de 284.505124 hm³/año y su disponibilidad

negativa de -149.81 hm³/año por lo cual se observa una magnitud de presión significativa. En términos simples, por cada 100 unidades de agua remanentes tras la descontar la DNC, se consideran aproximadamente 211 unidades para extracción (211%). Esto implica que el volumen considerado para extracción es más del doble del valor de referencia. Desde una perspectiva proporcional, esta situación representa la condición de mayor presión en los siete acuíferos analizados. Aunque el acuífero de Texcoco no presenta el mayor déficit absoluto, es el que exhibe la mayor presión relativa entre los acuíferos estudiados.

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, la relación es alrededor del 194%; en Cuautitlán-Pachuca, aproximadamente el 164%; y en Chalco-Amecameca, cerca del 149 %. Estos porcentajes no corresponden a un "índice de sobreexplotación" oficial emitido por CONAGUA, sino que reflejan que en los cuatro acuíferos con déficit hidrológico los volúmenes de aguas comprometidas o considerados para extracción exceden significativamente el volumen remanente disponible tras la recarga natural.

En conjunto, estos resultados evidencian que los principales problemas de disponibilidad hídrica se concentran en los cuatro acuíferos asociados con las áreas más urbanizadas de la Cuenca del Valle de México. Esta situación adquiere especial relevancia dado que Peña-Díaz (2019) señala que aproximadamente el 99 % de la población de la cuenca se distribuye en las zonas de Cuautitlán-Pachuca, Texcoco, Chalco-Amecameca y la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

En contraste, las unidades de Tecocomulco, Apan y Soltepec evidencian disponibilidades hídricas positivas, aunque con diferencias sustanciales entre ellas. Soltepec presenta la mayor disponibilidad, con 23.53 hm³/año, seguida por Tecocomulco con 17.34 hm³/año, y Apan con 2.76 hm³/año. La escasa disponibilidad en Apan es significativa, ya que aproximadamente el 90.9 % del volumen resultante tras la deducción de las descargas naturales comprometidas de la recarga constituye la cantidad considerada para extracción. Por lo tanto, si

bien su Disponibilidad Media Anual (DMA) aún es positivo, el margen disponible es considerablemente menor en comparación con Tecocomulco y Soltepec.

No obstante, la existencia de disponibilidad positiva en estos tres acuíferos no debe interpretarse como una compensación de los déficits registrados en los cuatro acuíferos restantes. Peña-Díaz (2019) señala que las áreas administrativas de gestión de aguas subterráneas en la Cuenca del Valle de México operan de manera prácticamente independiente entre sí, salvo por algunos flujos incipientes Cuautitlán-Pachuca, Apan y Soltepec. En consecuencia, la disponibilidad de un acuífero no puede considerarse automáticamente como un volumen físicamente transferible para compensar un déficit en otro acuífero.

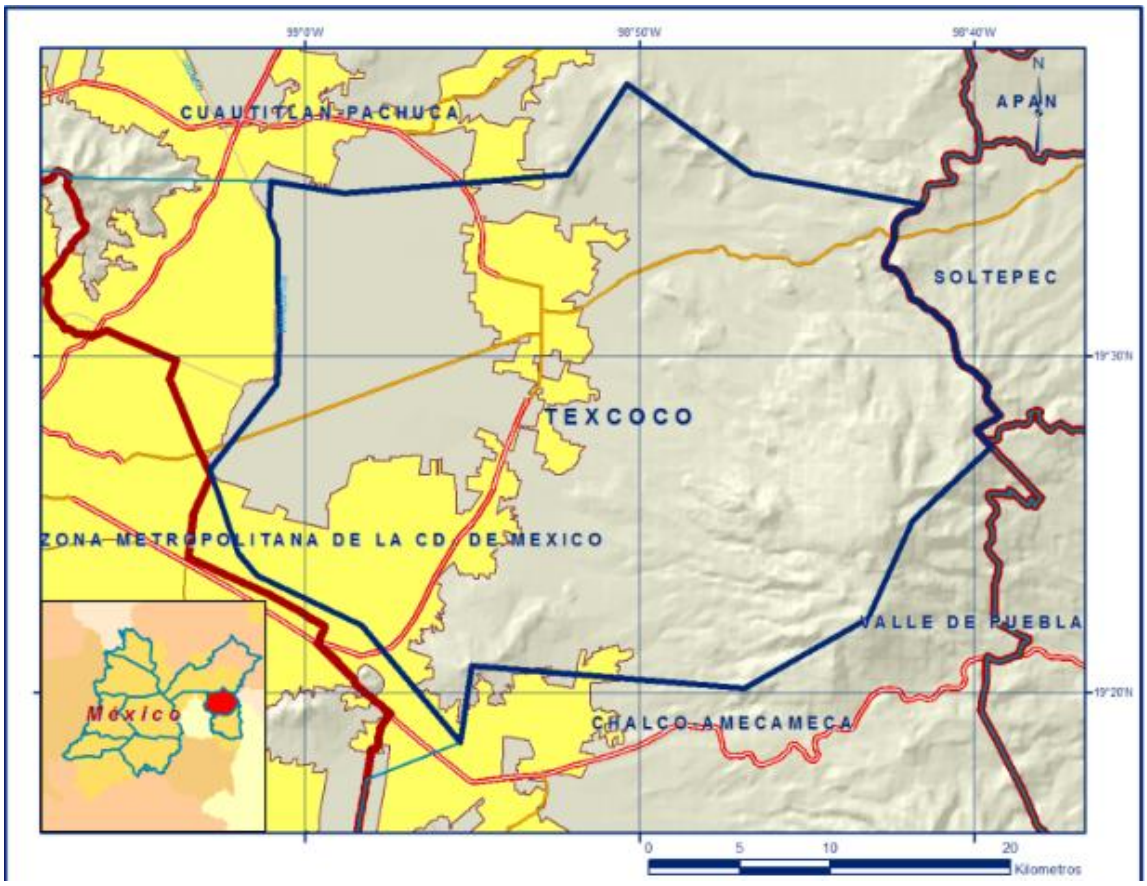
En términos generales, se refleja una limitación para ampliar las extracciones bajo las condiciones actuales. Asimismo, el propio acuerdo establece que, para la atención de solicitudes de nuevos títulos de concesión o asignación, CONAGUA debe tomar en cuenta la disponibilidad existente en el acuífero al momento de emitir la resolución correspondiente (Comisión Nacional del Agua, 2018).

Las condiciones hídricas de la cuenca del Valle de México evidencian una presión significativa sobre sus fuentes de agua subterránea, además de que la disponibilidad no es homogénea en todos los acuíferos que la componen. En este contexto, el acuífero de Texcoco adquiere particular relevancia para esta investigación, debido a su saldo anual negativo y a su relación con la zona donde se ubica el Parque Ecológico del Lago de Texcoco, por lo que resulta fundamental enfocar de manera específica el estudio de las características del acuífero Texcoco (1507), considerando aspectos como su ubicación, comportamiento piezométrico, balance de aguas subterráneas y disponibilidad del recurso.

2.5 Acuífero Texcoco

Ubicación. El acuífero Texcoco, identificado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024) con la clave 1507, se localiza en la región centro-oriental del Estado de México. Cuenta con una superficie aproximada de 934 km² (Figura 4) y está situado geográficamente entre los paralelos 19° 18’ y 19° 38’ de latitud norte, así como los meridianos 98° 39’ y 99° 03’ de longitud oeste.

Figura 4 Localización del acuífero



Fuente: CONAGUA (2024).

En cuanto a sus límites territoriales, al norte limita con el acuífero Cuautitlán-Pachuca, localizado en el Estado de México; al este, con el acuífero Soltepec, correspondiente a Tlaxcala; al sur y sureste, con el acuífero Chalco-Amecameca, también en el Estado de México; y al oeste, con el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Dentro de la estructura administrativa de gestión de recursos hídricos en el país, el acuífero Texcoco forma parte del Organismo de Cuenca XIII, denominado

“Aguas del Valle de México”, cuya jurisdicción territorial corresponde al Estado de México. La delimitación de este acuífero abarca una extensión que se distribuye entre diversos municipios de la entidad. Los municipios de Chicoloapan, Chimalhuacán, Chiconcuac, Papalotla y Texcoco están completamente incluidos en sus límites, mientras que Atenco, Chiautla, Ixtapaluca, Nezahualcóyotl, La Paz y Tepetlaoxtoc se encuentran en su mayoría dentro de su alcance. Además, la delimitación del acuífero incluye únicamente pequeñas porciones territoriales de Acolman, Ecatepec de Morelos y Tezoyuca (CONAGUA, 2024).

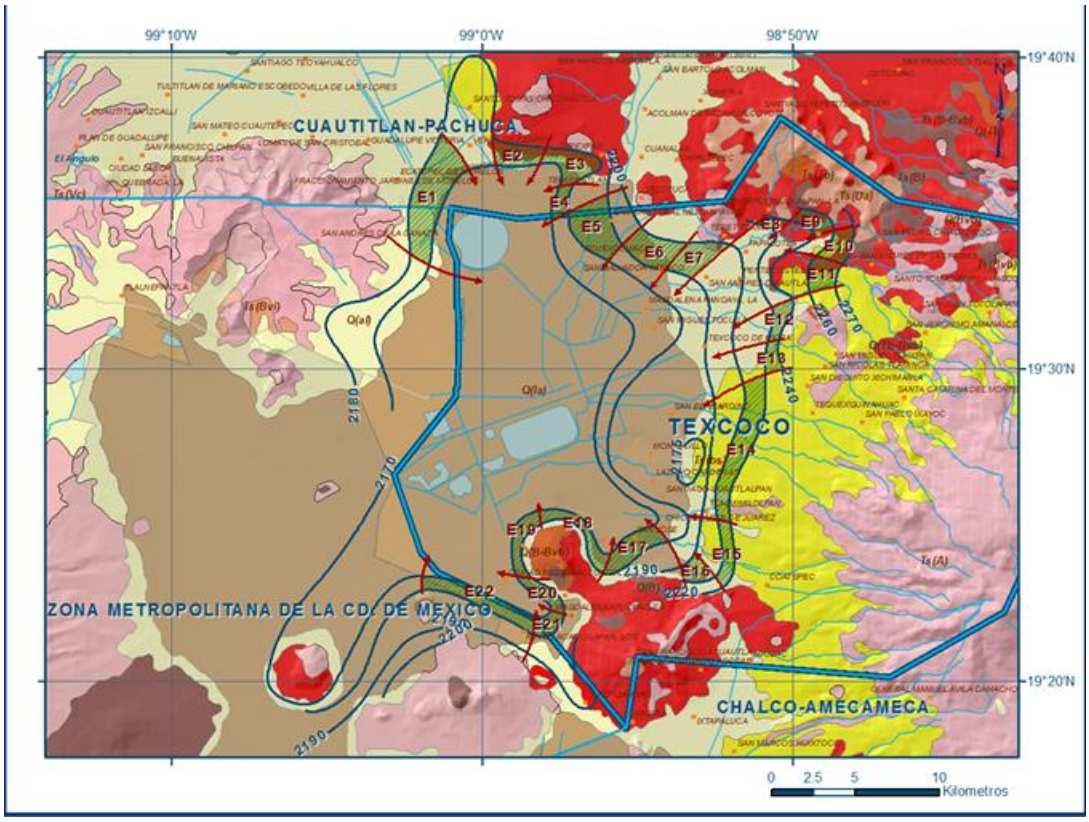
En términos hidrográficos, el acuífero de Texcoco forma parte de la Región Hidrológica número 26, Pánuco, específicamente dentro de la Subregión Hidrológica del Valle de México, en la cuenca del río Moctezuma. La red de drenaje superficial en esta zona se caracteriza por la predominancia de corrientes efímeras e intermitentes, cuya dinámica responde principalmente a eventos de precipitación que generan escurrimientos torrenciales y avenidas de corta duración. Debido a estas condiciones, una proporción significativa de los cauces permanece seca durante la temporada de estiaje. Dentro de los límites del acuífero, se identifican nueve cuencas hidrográficas correspondientes a los ríos Papalotla, Xalapango, Coxcacoaco, Texcoco, Chapingo, San Bernardino, Santa Mónica, Coatepec y San Francisco. Estos ríos se originan en las zonas altas de la Sierra Nevada y siguen una trayectoria descendente hacia la zona federal del ex lago de Texcoco, donde convergen sus escurrimientos. Posteriormente, el agua es conducida hacia el Sistema de Dren Colector del Valle, que finalmente integra los flujos de aguas residuales provenientes de la Ciudad de México (CONAGUA, 2024).

Hidrología

Respecto a la configuración de elevación del nivel estático para el año 2009, CONAGUA registra valores que varían de 2,300 a 2,170 msnm. Las menores elevaciones, de 2,160 a 2,190 msnm, se registran en toda la porción occidental del acuífero, en la zona que circunda el Lago Nabor Carrillo, la planta de tratamiento “El Caracol” y Texcoco. Las mayores elevaciones, de 2,220 a 2,300,

se registran en el extremo nororiental del acuífero, en las inmediaciones del poblado Santo Tomás y a lo largo de las estribaciones de la Sierra Quetzaltepec, desde donde descienden gradualmente, al igual que la profundidad por efecto topográfico, hacia el valle (Figura 5).

Figura 5 Zonas administrativas en materia de aguas superficiales (cuencas)



Fuente: CONAGUA, 2024

El término “nivel estático del agua” se refiere a la distancia desde la superficie del terreno hasta la zona de saturación (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2023, 23 de noviembre) por lo que los niveles estáticos del agua registrados en 2009 nos dice que existe un gradiente hidráulico regional desde las zonas altas del noreste hacia las partes bajas del valle es decir El agua subterránea tiende a desplazarse desde zonas donde la carga hidráulica o elevación piezométrica es mayor hacia aquellas donde es menor, de Sierra Quetzaltepec / noreste → valle de Texcoco → zona del Lago Nabor Carrillo

- Evolución del nivel estático

Comparando los niveles de 2009 con mediciones de años posteriores, se muestra cómo se comporta físicamente el agua dentro del acuífero, determinando aproximadamente si la superficie piezométrica ha descendido, permanecido relativamente estable o se ha recuperado (Cuadro 5)

Cuadro 5 Comparación de comportamiento de nivel estático 2009 & 2024

NOM_ACUIF	ELEV_TN	PNE_2009	PNE_2024	ENE_2009	ENE_2024	Variación elevación 2024-2009 (m)	Cambio PNE 2024-2009 (m)
TEXCOCO	2244	61.5	75.91	2182.5	2168.09	-14.41	14.41
TEXCOCO	2352	124.42	133.87	2227.58	2218.13	-9.45	9.45
TEXCOCO	2243	65.3	90.83	2177.7	2152.17	-25.53	25.53
TEXCOCO	2241	57.32	72.89	2183.68	2168.11	-15.57	15.57
TEXCOCO	2251	74.16	95.78	2176.84	2155.22	-21.62	21.62
TEXCOCO	2371	97.08	111.15	2273.92	2259.85	-14.07	14.07
TEXCOCO	2257	67.23	81.89	2189.77	2175.11	-14.66	14.66
TEXCOCO	2258	67.17	85.72	2190.83	2172.28	-18.55	18.55
TEXCOCO	2253	60.17	73.12	2192.83	2179.88	-12.95	12.95
TEXCOCO	2254	53.61	82.95	2200.39	2171.05	-29.34	29.34
TEXCOCO	2251	61.42	75.11	2189.58	2175.89	-13.69	13.69
TEXCOCO	2275	83.46	93.94	2191.54	2181.06	-10.48	10.48
TEXCOCO	2292	49.5	64.06	2242.5	2227.94	-14.56	14.56
TEXCOCO	2280	44.58	46.05	2235.42	2233.95	-1.47	1.47
TEXCOCO	2262	73.44	88.37	2188.56	2173.63	-14.93	14.93
TEXCOCO	2297	74.35	72.91	2222.65	2224.09	1.44	-1.44
TEXCOCO	2263	61.43	73.35	2201.57	2189.65	-11.92	11.92
TEXCOCO	2258	61.8	66.88	2196.2	2191.12	-5.08	5.08
TEXCOCO	2275	60.93	73.64	2214.07	2201.36	-12.71	12.71
TEXCOCO	2293	48.74	65.08	2244.26	2227.92	-16.34	16.34
TEXCOCO	2246	63.4	67.1	2182.6	2178.9	-3.7	3.7
TEXCOCO	2255	66.44	84.09	2188.56	2170.91	-17.65	17.65
TEXCOCO	2245	63.18	76.83	2181.82	2168.17	-13.65	13.65
TEXCOCO	2248	61.13	78.13	2186.87	2169.87	-17	17
TEXCOCO	2245	60.99	80.84	2184.01	2164.16	-19.85	19.85
TEXCOCO	2252	72.73	78.52	2179.27	2173.48	-5.79	5.79
TEXCOCO	2265	78.75	93.15	2186.25	2171.85	-14.4	14.4
TEXCOCO	2260	72.38	79.38	2187.62	2180.62	-7	7
TEXCOCO	2296	103.11	117.36	2192.89	2178.64	-14.25	14.25
TEXCOCO	2253	65.09	83.71	2187.91	2169.29	-18.62	18.62
TEXCOCO	2263	86	112.92	2177	2150.08	-26.92	26.92
TEXCOCO	2238	52.57	64.35	2185.43	2173.65	-11.78	11.78
TEXCOCO	2250	16.65	82.49	2233.35	2167.51	-65.84	65.84
TEXCOCO	2243	55.46	61.52	2187.54	2181.48	-6.06	6.06
TEXCOCO	2247	58.52	74.1	2188.48	2172.9	-15.58	15.58
TEXCOCO	2392	104.4	133.87	2287.6	2258.13	-29.47	29.47
TEXCOCO	2255	64.5	62.83	2190.5	2192.17	1.67	-1.67
TEXCOCO	2242	66.41	74.31	2175.59	2167.69	-7.9	7.9
TEXCOCO	2298	76.81	91.69	2221.19	2206.31	-14.88	14.88
TEXCOCO	2290	98.73	107.22	2191.27	2182.78	-8.49	8.49

Interpretación: Cambio PNE = PNE_2024 − PNE_2009. Un valor positivo indica que el nivel del agua se encuentra a mayor profundidad en 2024 (abatimiento); un valor negativo indica una recuperación. La comparación es puntual por pozo y no representa por sí sola un promedio espacial ponderado de todo el acuífero.

Fuente: Elaboración propia con datos recuperados de Comisión Nacional del Agua. (s. f.).

La comparación de los registros piezométricos disponibles para los años 2009 y 2024 revela una tendencia predominantemente decreciente en los niveles estáticos del acuífero Texcoco. De los 40 pozos con mediciones en ambos años, 38 evidencian una disminución en los niveles estáticos, mientras que únicamente 2 muestran una ligera recuperación. Este patrón indica que, durante el período analizado, el abatimiento constituye la tendencia principal en los puntos de monitoreo considerados.

Las variaciones observadas son consistentes con las condiciones piezométricas reportadas por Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024). y reflejan que la reducción de los niveles de agua subterránea ha persistido durante el período 2009–2024. Los abatimientos se presentan en diferentes sectores del acuífero, siendo particularmente significativos en varios puntos ubicados hacia su porción occidental. La continuidad de esta tendencia puede estar relacionada con una presión excesiva sobre las reservas subterráneas, especialmente en aquellas zonas donde los volúmenes extraídos superan la capacidad de recarga del sistema. Sin embargo, el abatimiento piezométrico por sí solo no permite determinar formalmente una condición de sobreexplotación; por lo tanto, su análisis debe complementarse con información acerca de la recarga, los volúmenes de extracción, el balance hídrico subterráneo y la evolución temporal de los niveles piezométricos.

De la elaboración del cuadro 5 “*Comparación de comportamiento de nivel estático 2009 & 2024”:*

- NOM_ACUIF: Nombre del acuífero
- Elev_TN: Elevación del terreno natural, msnm
- PNE_2009: Profundidad al nivel estático en 2009
- PNE_2024: Profundidad al nivel estático en 2024
- ENE_2009: Elevación nivel estático 2009 (ELEV_TN − PNE_2009)
- ENE_2024: Elevación nivel estático 2024(ELEV_TN − PNE_2024)
- Variación de elevación del nivel estático 2024−2009: Cambio de la superficie piezométrica

- Cambio PNE 2024−2009: Cambio en profundidad

Balance de aguas subterráneas

El balance de aguas subterráneas se fundamenta en el principio de conservación de la masa, conforme al cual la diferencia entre el volumen total que ingresa al sistema, conocido como recarga, y el volumen que sale de este, correspondiente a la descarga, se refleja en una variación en el agua almacenada en el acuífero durante un período determinado. De acuerdo con CONAGUA (2024), este principio puede expresarse mediante la ecuación general de balance:

Entradas (E) − Salidas (S) = Cambio en la masa

Para el caso específico del acuífero Texcoco, identificado con la clave 1507, este planteamiento se aplica considerando la recarga total como el conjunto de entradas al sistema y la descarga total como las salidas. En consecuencia, la diferencia entre ambos componentes determina el cambio en el volumen almacenado en el acuífero, expresado de la siguiente manera:

Recarga total − Descarga total = Cambio en el almacenamiento

En la actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), CONAGUA (2024) realizó el balance para el período 2006-2011, considerando una superficie aproximada de 700 km². Esta extensión corresponde al sector del acuífero para el cual se dispone de información piezométrica y donde, además, se concentra la mayor parte de los aprovechamientos de agua subterránea.

- **Entradas (Recarga total)**

De acuerdo con el modelo conceptual que describe el funcionamiento hidrodinámico del acuífero Texcoco, **la recarga total (R) está conformada por tres procesos** tanto de origen natural como inducido. La recarga natural se origina principalmente a través de la infiltración directa de la precipitación sobre el valle y del agua proveniente de escurrimientos superficiales que circulan por los cauces principales de la zona. Ambos procesos se agrupan bajo la categoría

de “**recarga vertical (Rv)”.** A esto se suma el agua que ingresa lateralmente al sistema acuífero mediante el **“flujo subterráneo horizontal (Eh)”.**

Por otra parte, las actividades humanas también contribuyen a la recarga del sistema subterráneo, englobadas en la **“recarga inducida (Ri)”** la cual se genera principalmente por la infiltración de una fracción del agua aplicada en actividades de riego que no es aprovechada por los cultivos, así como por las pérdidas asociadas a las redes de distribución de agua potable y alcantarillado, y por las infiltraciones relacionadas con las descargas de aguas residuales urbanas. En conjunto, estos procesos representan fuentes adicionales de alimentación para el acuífero.

- Recarga vertical (Rv)

La infiltración de precipitación y escurrimientos superficiales constituye una de las principales fuentes naturales de ingreso de agua al sistema. Según estimaciones de CONAGUA, la recarga vertical en el acuífero es de 101.1 hm^3/año

- Entrada por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Otra fuente natural de aporte corresponde al agua que ingresa mediante el movimiento horizontal del flujo subterráneo proveniente de áreas circundantes. La estimación de este componente es de 38.7 hm^3/año.

Para determinar las entradas y salidas relacionadas con el flujo subterráneo, se utilizó información de valores de transmisividad obtenidos de interpretaciones de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, así como durante el año 2010. Dichos valores fueron ajustados para reflejar las condiciones específicas del espesor saturado en las diferentes zonas del análisis (CONAGUA 2024).

- Recarga inducida (Ri)

La recarga inducida abarca las cantidades que retornan al sistema subterráneo como consecuencia del uso y conducción del agua. Para su estimación, considerando la falta de información detallada sobre las láminas de riego

aplicadas, se asumió un coeficiente de infiltración del 2%, teniendo en cuenta la predominancia de materiales arcillosos en el acuitardo.

Partiendo de un volumen anual destinado a actividades agrícolas de 35.0 hm^3, se calculó que aproximadamente 2.7 hm^3/año retornan al acuífero mediante procesos de infiltración por riego. Similarmente, considerando un volumen de 128.4 hm^3/año para el abastecimiento público y urbano, las pérdidas relacionadas con las redes de distribución de agua podrían contribuir con aproximadamente 2.6 hm^3/año. La suma de estos aportes da una recarga inducida total estimada de 5.3 hm^3/año (CONAGUA 2024)

Finalmente considerando todos los componentes, la recarga total del acuífero se obtiene sumando la recarga vertical, el flujo subterráneo horizontal y la recarga inducida:

$R = Rv + Eh + Ri$

$R = 101.1 + 38.7 + 5.3 = 145.1$ hm^3/año

Este resultado indica que la principal aportación al acuífero proviene de la recarga vertical, seguida por las entradas de flujo subterráneo horizontal. La recarga inducida constituye una proporción menor del volumen total que ingresa al sistema, aunque sigue siendo significativa en el equilibrio hidrológico del acuífero Texcoco.

- **Salidas (Descarga)**

Las principales salidas del sistema se identifican en dos componentes: la extracción de agua subterránea mediante bombeo (B) y la descarga natural a través de manantiales (Dm). Es importante señalar que, de acuerdo con la información de CONAGUA, no se consideran en este balance otras formas de salida, como el flujo subterráneo horizontal (Sh), la descarga por flujo base (Dfb) o la evapotranspiración (ETR), dado que estos mecanismos no han sido identificados en la evaluación establecida (CONAGUA 2024).

Extracción por bombeo (B): El bombeo representa el principal mecanismo de salida de agua del acuífero, correspondiendo al volumen extraído a través de los diversos aprovechamientos existentes en la zona. Según datos de CONAGUA (2024), la extracción anual atribuible a esta actividad es de 183.1 hm³/año.

Descarga natural por manantiales (Dm): Adicionalmente, parte del agua subterránea se libera de forma natural mediante los manantiales. En la zona del acuífero, se identifican 19 manantiales con un caudal total estimado de 330 litros por segundo (CONAGUA 2024), lo cual equivale aproximadamente a un volumen anual de Dm = 10.4 hm³/año. Para efectos de disponibilidad hídrica, CONAGUA considera esta cantidad como descarga natural comprometida (DNC) dado que corresponde al flujo que debe mantenerse para preservar el ecosistema y los recursos del acuífero.

Por lo tanto la descarga total del acuífero puede calcularse como la suma de la extracción por bombeo y la descarga natural de los manantiales:

➔ Descarga total = B + Dm = 183.1 + 10.4 = 193.5 hm³/año

En conclusión, el bombeo constituye la principal forma de salida del acuífero Texcoco, concentrando la mayor proporción del volumen total descargado del sistema.

Disponibilidad media anual de agua subterránea

La determinación de la disponibilidad de agua subterránea se realiza conforme al procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, la cual define las especificaciones y el método para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Para el caso de las aguas subterráneas, la disponibilidad corresponde al resultado de descontar de la recarga total media anual tanto la descarga natural comprometida como la extracción de aguas subterráneas (CONAGUA, 2024).

De manera general, esta relación se expresa como:

DMA = R − DNC − E

donde:

- **DMA**: Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en el acuífero
- **R**: Recarga total media anual
- **DNC** = Descarga natural comprometida
- **E** = Extracción de aguas subterráneas

En este sentido, la disponibilidad media anual representa el volumen de agua subterránea que podría destinarse a nuevos aprovechamientos, adicional a los volúmenes previamente comprometidos, sin afectar las descargas naturales que deben conservarse ni comprometer las condiciones ambientales asociadas al funcionamiento del acuífero. Para el acuífero Texcoco (1507) al sustituir los valores reportados anteriormente se obtiene:

$$DMA = 145.1 - 10.4 - 284.505124$$

$$DMA = -149.805124 \text{ hm}^3/\text{año}$$

El valor negativo obtenido evidencia que el acuífero Texcoco no dispone de un volumen susceptible de ser otorgado para nuevas concesiones o asignaciones. Por el contrario, presenta un déficit de 149.805124 hm³/año (CONAGUA, 2024).

- **Problemática.**

El acuerdo CONAGUA, 2018 menciona que las principales consecuencias derivadas de la explotación intensiva de recursos hídricos subterráneos incluyen la disminución de los niveles de agua en acuíferos, alteraciones en el sistema de flujo, reducción del caudal y rendimiento de los pozos, así como un incremento en los costos asociados al bombeo. Además, la extracción prolongada ha favorecido la ocurrencia de hundimientos diferenciales del suelo, potencialmente afectando la infraestructura urbana. Si los niveles de extracción se mantienen o aumentan, estos efectos podrían agravarse, resultando en la inoperatividad de algunos pozos, la desaparición o disminución de manantiales y un deterioro adicional en las condiciones del acuífero. A esta problemática cuantitativa se suma el riesgo de deterioro en la calidad del agua subterránea, ocasionado por

diversas fuentes potenciales de contaminación, tales como la infiltración de retornos agrícolas con agroquímicos, fugas en las redes de alcantarillado y lixiviados generados en sitios de disposición de residuos y zonas industriales.

En respuesta a estas condiciones, la regulación de las extracciones resulta un elemento clave para reducir la presión sobre el acuífero. En este contexto, CONAGUA ha señalado la necesidad de implementar instrumentos de control dentro de sus límites regulatorios, incluyendo la delimitación de zonas de veda y la actualización del padrón de usuarios de aguas subterráneas, con el objetivo de fortalecer la gestión y vigilancia de los aprovechamientos (CONAGUA, 2018).

Literatura citada

Capitulo I

- Comisión Nacional del Agua. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México*. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1507.pdf
- Comisión Nacional del Agua. (2026, 30 de junio). *Base de datos del REPDA*. https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/registro-publico-de-derechos-de-agua-repda-55190
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023, 21 de marzo). *"Water scarcity means less water for agriculture production which in turn means less food available, threatening food security and nutrition"*. https://www.fao.org/newsroom/detail/water-scarcity-means-less-water-for-agriculture-production-which-in-turn-means-less-food-available-threatening-food-security-and-nutrition/
- Hanemann, W. M. (2006). The economic conception of water. En P. P. Rogers, M. R. Llamas y L. Martínez-Cortina (Eds.), *Water crisis: Myth or reality?* (pp. 61–74). Taylor & Francis.
- Madani, K. (2026). *Global water bankruptcy: Living beyond our hydrological means in the post-crisis era*. United Nations University Institute for Water, Environment and Health. https://doi.org/10.53328/INR26KAM001
- Tomasini, D. (s. f.). *Valoración económica del ambiente*. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

https://www.cofemersimir.gob.mx/expediente/20845/mir/43026/anexo/3804328

- Uribe Visoso, R., & Vázquez del Mercado Arribas, R. (2017). La huella hídrica de México. En R. Vázquez del Mercado Arribas & J. Lambarri Beléndez (Eds.), *Huella hídrica en México: Análisis y perspectivas* (pp. 35–54). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/huella-hidrica/files/assets/basic-html/page5.html

Capítulo II

- Ahams, I. C., Paterson, W., Garcia, S., Rushforth, R., Ruddell, B. L., & Mejia, A. (2017). Water footprint of 65 mid- to large-sized U.S. cities and their metropolitan areas. *Journal of the American Water Resources Association, 53*(5), 1147–1163. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12563
- Arboleda-Tabares, D. A., Talero, J. E. R., Pérez, S. A. Q., & Rodríguez, C. A. A. (2022). La huella hídrica como estrategia educativa para el consumo responsable de agua en la Universidad Santiago de Cali. *Estudios Pedagógicos, 48*(2), 131–158. https://doi.org/10.4067/S0718-07052022000200131
- Bautista, N. (2014). Evaluación de la política de acceso al agua potable en el Distrito Federal, Arsenio González (coord.), UNAM, Programa Universitario de Estudio sobre la Ciudad, México, 2011. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía, 45*(176), 189–191.
- Casals Miralles, C., Barioni, D., Mancini, M. S., Colón Jordà, J., Boy Roura, M., Ponsá Salas, S., Llenas Argelaguet, L., & Galli, A. (2023). The footprint of tourism: A review of water, carbon, and ecological footprint applications to the tourism sector. *Journal of Cleaner Production, 422*, 138568. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138568
- Castán Aquino, Y. I. (2018). *Sostenibilidad hídrica en la Ciudad de México: El sistema de suministro de agua* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2018/enero/0769807/Index.html
- Cervantes Carretero, E. A., López Pérez, M., Güitrón de los Reyes, A., Morales Musito, A. L., González Avilés, M. E., & de la Cruz Bartolón, J. (2017). Cálculo de la huella hídrica azul directa para uso doméstico y agrícola. En R. Vázquez del Mercado & J. Lambarri (Eds.), *Huella hídrica*

en México: Análisis y perspectivas (pp. 151–152). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- Comisión Nacional del Agua. (s. f.). *Mediciones piezométricas: Subgerencia de Exploración y Monitoreo Geohidrológico. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas*. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/RedesMonitoreo_Piezometrico.html
- Comisión Nacional del Agua. (2018). Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Texcoco, clave 1507, en el Estado de México, Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. *Diario Oficial de la Federación*. https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5572270
- Comisión Nacional del Agua. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Texcoco (1507), Estado de México*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Delgado-Ramos, G. C., & Guibrunet, L. (2017). Evaluación de la dimensión ecológica de la resiliencia y sostenibilidad urbanas. *International Journal of Urban Sustainable Development*. https://doi.org/10.1080/19463138.2017.1341890
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2013). *Afrontar la escasez de agua: Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria* (Informe sobre temas hídricos n.º 38).
- González, R. A., Jiménez-Cisneros, B., Gutiérrez, R. R., & Marañón, B. P. (2011). *Evaluación de la política de acceso al agua potable en el Distrito Federal*. PUEC, II, IIEc, UNAM, Academia Mexicana de Ciencias, Evalúa DF.
- Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J.-P., Dubois, G., Lehmann, L. V., & Scott, D. (2012). Tourism and water use: Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management, 33*(1), 1–15. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2011.03.015
- Hadjikakou, M., Chenoweth, J., & Miller, G. (2013). Estimating the direct and indirect water use of tourism in the eastern Mediterranean. *Journal of Environmental Management, 114*, 548–556. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.002
- Jiménez Cisneros, B., Gutiérrez Rivas, R., Marañón Pimentel, B., & González Reynoso, A. (2011). *Evaluación de la política de acceso al agua potable en el Distrito Federal*. Universidad Nacional Autónoma de México,

Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad. https://evalua.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/files/Atribuciones/programassociales/Eexternas/2009/inf_agu.pdf

- Jiménez-Cisneros, B. (2014). Ciudades sustentables: Agua, ciudades y futuro. *Ciencia*, *65*(4), 14–19. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/65_4/PDF/Agua.p
- Kaika, M. (2006). The political ecology of water scarcity: The 1989–1991 Athenian drought. En N. C. Heynen, M. Kaika, & E. Swyngedouw (Eds.), *In the nature of cities: Urban political ecology and the politics of urban metabolism* (p. 265). Routledge, Taylor & Francis Group.
- Los editores de la Enciclopedia Británica. (2026, 18 de marzo). ¿Cuáles son las 10 áreas metropolitanas más grandes del mundo? *Enciclopedia Británica*. https://www.britannica.com/question/What-are-the-10-largest-metropolitan-areas-in-the-world
- Ma, D., Xian, C., Zhang, J., Zhang, R., & Ouyang, Z. (2015). The evaluation of water footprints and sustainable water utilization in Beijing. *Sustainability, 7*(10), 13206–13221. https://doi.org/10.3390/su71013206
- Molle, F., & Mollinga, P. P. (2003). Water poverty indicators: Conceptual problems and policy issues. *Water Policy, 5*(5–6), 529–544. https://doi.org/10.2166/wp.2003.0034
- O'Connor, M. (2006). The "four spheres" framework for sustainability. *Ecological Complexity, 3(4), 285–292*. https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2007.02.002
- UN-Water. (2013). *Water security and the global water agenda: A UN-Water analytical brief*. United Nations University.. https://www.unwater.org/publications/water-security-and-global-water-agenda
- Organización de las Naciones Unidas. (2026). *Water scarcity*. https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity
- Ortega Guerra, M. A. (2023). *Cálculo de huella hídrica para organismos operadores de agua potable* [Tesis de maestría, Universidad de Guanajuato].
- Patterson, W., Rushforth, R., Ruddell, B. L., Konar, M., Ahams, I. C., Gironás, J., Mijic, A., & Mejia, A. (2016). Water footprint of cities: A review and suggestions for future research. *Sustainability, 7*(7), 8461–8490. https://doi.org/10.3390/su7078461

- Peña, R. J. (2012). *Crisis del agua en Monterrey, Guadalajara, San Luis Potosí, León y la Ciudad de México (1950–2010)*. PUEC-UNAM.
- Peña-Díaz, S. (2019). Condiciones hídricas en la cuenca del Valle de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-02-04
- Perea Bello, G. (2013). *Prospectiva del proceso de la privatización del agua en México por parte de empresas trasnacionales (2013–2018)* [Tesis de licenciatura].
- PNUD. (2006). *Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua. Informe sobre el Desarrollo Humano 2006*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Rathnayaka, K., Malano, H., & Arora, M. (2016). Evaluación de la sostenibilidad de las opciones de gestión de la oferta y la demanda de agua urbana: Un enfoque integral. *Water, 8*(12), 595. https://doi.org/10.3390/w8120595
- Rogers, P., & Hall, A. W. (2003). *Effective water governance* (TEC Background Papers No. 7). Global Water Partnership. https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/background-papers/07-effective-water-governance-2003-english.pdf
- Rygaard, M., Binning, P. J., & Albrechtsen, H. J. (2011). Increasing urban water self-sufficiency: New era, new challenges. *Journal of Environmental Management, 92*(1), 185–194.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015,). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5389380&fecha=20/04/2015#gsc.tab=0
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023, 9 de noviembre). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5708074&fecha=09/11/2023
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023, 23 de noviembre). *Norma Oficial Mexicana NOM-004-CONAGUA-1996, requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y*

rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5709271&fecha=23%2F11%2F2023#gsc.tab=0

- Stack Whitney, K., & Whitney, K. (2018, primavera). El “agua virtual” de John Anthony Allan: La gestión de los recursos naturales tras el neoliberalismo. *Environment & Society Portal, Arcadia*, (11). Rachel Carson Center for Environment and Society. https://doi.org/10.5282/rcc/8316

- Zapata-Pinedo, J. E., Guarda, T., Herrera-Vidal, G., Coronado-Hernández, O. E., & Coronado-Hernández, J. R. (2026). Assessing urban water footprint: An integrated analytical framework for urban systems. *Water, 18*(11), 1347. https://doi.org/10.3390/w18111347

CAPÍTULO 3. HUELLA HÍDRICA AZUL EN EL PARQUE ECOLÓGICO DEL LAGO DE TEXCOCO[3]

Claudia Rubí Quintana Domínguez1, (https://orcid.org/0009-0004-1534-6933)
Dr. Ramón Valdivia-Alcalá1*, (https://orcid.org/0000-0003-0434-3169)
Dr. Fermín Sandoval-Romero3, (https://orcid.org/0000-0002-4108-4744)

1Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México.

*Autor para correspondencia: ramvaldi@gmail.com, +52 595 951 7058

3.1 Resumen

Los espacios recreativos requieren agua para mantener en funcionamiento los servicios utilizados por sus visitantes, por lo que conocer el volumen asociado con estas actividades puede contribuir a mejorar la gestión del recurso. El objetivo de esta investigación fue estimar la huella hídrica azul directa asociada con las visitas de los usuarios al Parque Ecológico Lago de Texcoco (PELT) e identificar los principales componentes del consumo de agua durante su estancia. Se aplicó una encuesta a 50 visitantes durante dos fines de semana consecutivos y se utilizaron datos operativos proporcionados por la administración del parque. El análisis consideró principalmente el uso de sanitarios, lavamanos y el consumo de agua potable. A partir de un volumen operativo aproximado de 50 000 L por periodo y una afluencia promedio de 2 859 visitantes, se estimó una huella hídrica azul directa de 17.49 L/visitante, bajo el supuesto de un flujo de retorno igual a cero. Los sanitarios presentaron el mayor consumo de los componentes evaluados, con 7.28 L/visitante, mientras que el uso de lavamanos representó aproximadamente 1.8 L/visitante; en conjunto, ambos componentes explicaron alrededor del 51.91 % del volumen operativo promedio estimado por visitante. El indicador obtenido constituye una primera aproximación que puede utilizarse

[3] Artículo enviado a la revista: Tecnología y ciencias del agua.

como referencia para el seguimiento del consumo de agua y la evaluación posterior de medidas orientadas a mejorar la eficiencia hídrica en el PELT.

Palabras clave: Huella hídrica azul, consumo de agua, gestión de los recursos hídricos, Turismo, Conservación del agua

Abstract

Recreational areas require water to maintain the services used by visitors; therefore, understanding the volume of water associated with these activities can contribute to improved water resource management. This study estimated the direct blue water footprint associated with visits to the Texcoco Lake Ecological Park (PELT) and identified the main components of water use during visitors' stays. A survey was administered to 50 visitors over two consecutive weekends, and operational data provided by the park administration were also used. The analysis focused primarily on water use in toilets and handwashing facilities, as well as drinking water consumption. Based on an approximate operational water volume of 50 000 L per period and an average attendance of 2 859 visitors, the direct blue water footprint was estimated at 17.49 L per visitor, assuming zero return flow. Toilets accounted for the highest water use among the components evaluated, at 7.28 L per visitor, while handwashing accounted for approximately 1.8 L per visitor. Together, these two components represented approximately 51.91% of the estimated average operational water volume per visitor. The resulting indicator provides an initial estimate that can serve as a baseline for monitoring water use and for the subsequent evaluation of measures aimed at improving water-use efficiency at the PELT.

Keywords: Blue water footprint, Water consumption, Water resources management, Tourism, Water conservation.

3.2 Introducción

El agua dulce es un recurso fundamental para el desarrollo humano, de las actividades económicas y el funcionamiento de los ecosistemas. Sin embargo, el crecimiento de la población, la urbanización y el aumento de la demanda han generado una mayor presión sobre las fuentes disponibles, por lo que es fundamental contar con herramientas que muestren tanto los volúmenes de agua utilizados como la relación entre el consumo y las actividades que lo generan.

La huella hídrica es un indicador que evalúa la cantidad de agua dulce utilizada por las actividades humanas, distinguiendo su origen y los componentes asociados a su aprovechamiento (Hoekstra et al., 2011). En particular, la huella hídrica azul se relaciona con el consumo de agua proveniente de fuentes superficiales y subterráneas, siendo de especial relevancia en regiones donde estas fuentes se encuentran bajo una presión elevada.

Aunque la mayoría de los estudios sobre huella hídrica se han centrado en actividades agrícolas, industriales y consumo de bienes, su aplicación se ha ampliado a ciudades, turismo y actividades recreativas. En estos espacios, el consumo de agua incluye sanitarios, lavamanos, limpieza, mantenimiento de áreas verdes y servicios para visitantes, variando según la infraestructura, servicios y afluencia de usuarios (Gössling et al., 2012; Casals Miralles et al., 2023). En el caso de las actividades turísticas y recreativas, el número de visitantes representa un factor importante debido a que genera una demanda temporal adicional sobre los recursos disponibles en el lugar donde se desarrolla la actividad, por otro lado Hadjikakou et al. (2013) señalan que el análisis del consumo de agua asociado con estas actividades debe considerar las condiciones particulares del destino, especialmente cuando existe escasez o competencia por el recurso. Sin embargo, a pesar de que existen estudios sobre huella hídrica aplicada al turismo, ciudades y diferentes actividades humanas, existe menor información sobre la huella hídrica azul directa generada por los

usuarios de espacios recreativos urbanos y su relación con las condiciones hídricas de la zona donde se desarrollan. En el caso de los parques y espacios verdes urbanos, las investigaciones se han enfocado principalmente en las necesidades de riego de la vegetación, y los factores que determinan su consumo de agua (Pan et al., 2023), sin embargo, se encuentra menos documentada la cuantificación de la huella hídrica azul directo asociada específicamente con los visitantes de espacios recreativos urbanos.

Bajo este contexto el Parque Ecológico Lago de Texcoco (PELT) constituye un caso de interés ya que es uno de los proyectos ambientales más relevantes en el oriente del Valle de México, impulsado por el Gobierno Federal y a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), teniendo como objetivo central la recuperación hídrica y ecológica de más de 14 mil hectáreas del antiguo vaso lacustre. Ubicado dentro del Área de Protección de Recursos Naturales (APRN) Lago de Texcoco, sitio de importancia internacional, con presencia de humedales, cuerpos de agua artificiales y zonas de vegetación que funcionan como refugio para aves acuáticas residentes y migratorias. Contando también con infraestructura recreativa diversa, como canchas deportivas, ciclovías, senderos y zonas de visitación, lo que implica una demanda de agua asociada con la estancia de los usuarios dentro del parque en una región donde las condiciones de disponibilidad del agua subterránea representan un elemento importante para la gestión del recurso (CONAGUA, 2022). Esta información puede ser útil para identificar los componentes que generan una mayor demanda de agua y establecer medidas dirigidas a mejorar la eficiencia en su aprovechamiento.

Esta necesidad de relacionar los espacios verdes urbanos con las condiciones hidrológicas del territorio también ha sido señalada para la Ciudad de México. Canteiro et al. (2025) analizaron la relación entre los espacios verdes urbanos, los acuíferos someros y la disponibilidad de agua, destacando la importancia de incorporar el funcionamiento hidrológico de estos espacios dentro de la planeación y sostenibilidad de las ciudades. Sin embargo, mientras este tipo de investigaciones se concentra principalmente en procesos como la infiltración y

recarga, el presente estudio aborda otra dimensión del problema: el consumo directo de agua generado por los usuarios de un espacio recreativo.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue estimar la huella hídrica azul directa asociada con las visitas de los usuarios al Parque Ecológico del Lago de Texcoco e identificar los principales componentes del consumo de agua durante su estancia. Para ello, se utilizaron encuestas aplicadas a los visitantes y datos operativos proporcionados por la administración del parque, con el propósito de generar información que contribuya al análisis y gestión del recurso hídrico dentro de este espacio recreativo.

3.3 Metodología

3.3.1 Área de estudio, fuente de información, diseño y aplicación de la encuesta

La investigación se realizó en el Parque Ecológico del Lago de Texcoco (PELT), ubicado en el oriente del Valle de México. El estudio se enfocó en el consumo de agua asociado directamente con los visitantes durante su estancia en el parque, considerando principalmente el uso de sanitarios, lavamanos y el consumo de agua potable.

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron dos fuentes principales de información. La primera correspondió a datos obtenidos directamente mediante encuestas aplicadas a los visitantes del PELT. La segunda estuvo integrada por información operativa proporcionada por personal del parque, relacionada con el volumen de agua utilizado para su funcionamiento, las características de los dispositivos sanitarios y los registros de afluencia de visitantes.

Se aplicaron 50 encuestas durante dos fines de semana consecutivos. La selección de los participantes se realizó invitando a participar de manera voluntaria a visitantes localizados en diferentes áreas del PELT durante los periodos de levantamiento. La aplicación en distintos puntos del parque tuvo como finalidad incluir usuarios presentes en diferentes espacios recreativos y de servicio. El cuestionario tomó como referencia la versión extendida de la

calculadora de Water Footprint y se complementó con preguntas específicas relacionadas con el consumo de agua durante la estancia de los usuarios en el PELT (Cuadro 6)

Las preguntas específicas del parque permitieron registrar la frecuencia de uso de lavamanos y sanitarios, el tiempo durante el cual los usuarios mantienen abierta la llave, el uso de regaderas y el consumo de agua potable durante la visita. Adicionalmente, se incorporaron variables personales y una pregunta relacionada con la disposición declarada a pagar por los servicios proporcionados por el parque.

La información obtenida mediante las encuestas fue registrada en una base de datos para su posterior procesamiento. Para cada visitante se identificaron los usos de agua directamente relacionados con su estancia dentro del PELT, los cuales se utilizaron para estimar la huella hídrica azul directa por usuario.

De acuerdo con la información operativa proporcionada por el PELT, se utilizaron aproximadamente 50,000 L de agua durante cada periodo de operación de fin de semana para actividades relacionadas con limpieza, servicios sanitarios, lavamanos y otros usos. Asimismo, se contó con registros de 3,618 visitantes durante el periodo del 21 al 23 de noviembre de 2025 y 2,100 visitantes durante el 28 y 29 de noviembre del mismo año. Para estimar el volumen de agua utilizado en los lavamanos se consideraron los dos tipos de llaves reportados por el personal del PELT: llaves temporizadoras Helvex, con un gasto de referencia de 7 a 8 L/min, y llaves economizadoras Helvex, con un gasto de 3 a 4 L/min. Estos registros se utilizaron posteriormente para estimar el consumo asociado con la afluencia de usuarios.

De acuerdo con el Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. La huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada (HHarea) se calcula como la suma de las huellas hídricas de proceso de todos los procesos que requieren agua en la zona, en este caso el proceso de servicio sanitario.

Cuadro 6 Formato de encuesta

N °	Pregunta	Unidad de respuesta
	water footprint	
1	País de residencia	
2	Consumo de productos de cereales (trigo, arroz, maíz, etc.)	kg por semana
3	Consumo de productos cárnicos	kg por semana
4	Consumo de productos lácteos	kg por semana
5	Consumo de huevos a la semana	Piezas por semana
6	¿Cómo prefieres tomar tus alimentos? Bajo en grasa , alto en grasa, grasa promedio	Bajo, alto O medio
7	¿Cómo es tu consumo de azúcar y dulces?	Bajo, alto O medio
8	Verduras	kg por semana
9	Frutas	kg por semana
10	Raices feculentas(patata, yuca)	kg por semana
11	tazas de café al dia	Tazas por dia
12	Tazas de te	Tazas por dia
13	¿Cuántas duchas tomas al día?	Numero
u	¿Cuál es la duración media de cada ducha?	Minutos
15	¿Sus duchas tienen cabezales de ducha estándar o de bajo caudal?	Si/No
16	¿Cuántos baños te das a la semana?	Numero
17	¿Cuántas veces al día te cepillas los dientes, te afeitas o te lavas la cara?	Numero
18	¿Dejas el grifo abierto mientras te cepillas los dientes y te afeitas?	Si/No
19	¿Cuántas veces usas la lavadora en una semana normal?	Numero
20	¿Tienes un inodoro de doble descarga?	Si/No
21	Si lavas los platos a mano, ¿cuántas veces se lavan los platos al dia?	Numero
22	¿Cuánto tiempo corre el agua durante cada lavado?	Minutos
23	Si tienes lavavajillas, ¿cuántas veces a la semana lo usas?	Numero
24	¿Cuántas veces por semana lavas el coche?	Numero
25	¿Cuántas veces a la semana riegas tu jardín?	Numero
26	¿Cuánto tiempo riegas tu jardín cada vez?	Minutos
27	¿Cuánto tiempo a la semana dedica a enjuagar equipos, entradas de vehículos o banquetas a la semana?	Minutos
28	Si tienes una piscina, ¿cuál es su capacidad?	Numero
29	¿Cuántas veces al año vacías tu piscina?	Numero
30	¿ Cual es su ingreso anual?	$
	PELT	
31	Dentro del parque cuantas veces se lava las manos	Numero
32	¿Cuatos minutos dejas correr el agua?	Minutos
33	Dentro del parque cuantas veces usa el sanitario	Numero
34	Dentro del parque cuantas veces usa la regadera	Numero
35	Dentro del parque cuanta agua usa del bebedero	Numero
36	bebederos?	Litros
37	Por los servicios que da el parque si se pusiera una tarifa de entrada ¿cuanto estaria dispuesto a pagar? Nada, $5-$10, otra	
	PERSONALES	
38	Edad	Años
39	Sexo	M/H

Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, se realizó un análisis de carácter descriptivo y exploratorio sobre la disposición declarada a pagar por los servicios proporcionados por el PELT. Para esta variable se calcularon frecuencias, porcentajes y promedio de los valores declarados por los visitantes.

3.3.2 Huella hídrica azul directa por visitante

La estimación de la huella hídrica azul directa asociada con los visitantes del PELT se realizó tomando como referencia el enfoque metodológico propuesto por Hoekstra et al. (2011). De acuerdo con este enfoque, la huella hídrica azul corresponde al volumen de agua superficial o subterránea consumida durante un proceso, considerando como consumo la fracción de agua que no regresa a la misma fuente de donde fue extraída o que no se encuentra disponible nuevamente en el mismo periodo.

Para este cálculo se utilizó el volumen de agua consumida que no regresa a la fuente.

$$\mathbf{HH_{Azul}} = \sum (\text{Extracción de agua} - \text{Flujo de retorno}) \quad (1)$$

Donde:

- Extracción de agua: Porción de agua que es desviada, extraída o derivada, ya sea de una fuente superficial o de una fuente de agua subterránea, con la finalidad de ser utilizada para fines humanos (Young, 2015).
- Flujo de retorno: Parte del agua extraída que regresa al mismo lugar donde fue extraída (Hoekstra, 2011).

Para el caso del PELT, la estimación se concentró en los usos de agua directamente relacionados con la estancia de los visitantes y que pudieron ser identificados mediante las encuestas y la información operativa disponible. Se consideraron tres componentes principales: uso de sanitarios, uso de lavamanos y consumo de agua potable durante la visita. Estos componentes se calcularon inicialmente por visitante y posteriormente se integraron para obtener un indicador de consumo directo expresado en m^3 por persona visitante por visita

Si damos por hecho que toda el agua utilizada es para el consumo de sanitarios, lavamanos y otros servicios por usuario, para el cálculo de HH_{Azul} directa por visitante (HH_U) será:

$$\boldsymbol{HH_U} = \frac{\text{HHAzul}}{\bar{\boldsymbol{N}}} / 1000 \qquad (2)$$

Donde:

- HH_U= HH_{Azul} directa por visitante
- HH_{Azul} : Agua total consumida por el parque (Litros)
- $\bar{\mathbf{N}}$**:** Numero de visitantes promedio (De los dos periodos registrados)

Debido a que no se contó con mediciones del volumen de retorno ni con información suficiente para determinar la proporción de agua que retorna a la fuente de abastecimiento, para efectos de la estimación se adoptó el supuesto de un flujo de retorno igual a cero ($F_{retorno} = 0$). En consecuencia, los resultados obtenidos bajo este supuesto representan una estimación del límite superior de la huella hídrica azul directo asociada con los usos analizados.

3.3.3 Huella hídrica del consumo promedio de agua potable por persona

El volumen de agua potable consumida durante la estancia se obtuvo a partir de la cantidad reportada por cada visitante mediante la encuesta.

Debido a que los usuarios reportaron un consumo nulo de agua de los bebederos, pero si del agua que llevaron desde su casa o compraron por fuera ese volumen no será atribuible al abastecimiento de agua del PELT

Con los resultados de las encuestas (Cuadro 7) se promedió el consumo de agua de bebida por usuario:

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \left[\frac{1}{\text{Ne}}\left(\sum_{\mathbf{1}}^{\mathbf{50}} \boldsymbol{Consumo\ de\ agua\ potable\ por\ usuario}\right)\right] \qquad (3)$$

Donde:

- $\bar{v}$: Consumo promedio de agua de bebida por usuario

- N_e: Visitantes encuestados total

3.3.4 Huella hídrica por uso sanitario

Consumo estimado en sanitarios por persona: Apoyándonos del manual para la evaluación de la HH en una vivienda, de los resultados de las encuestas (Cuadro 8) y la información dada del personal del PELT, calculamos la HH por uso de sanitarios a partir del número de veces que cada visitante reportó utilizar este servicio durante su estancia y del volumen de agua utilizado por descarga. De acuerdo con la información proporcionada por personal del PELT, los dispositivos sanitarios utilizan 4 L por descarga.

➔ Para cada visitante se calculó:

$$\boldsymbol{V_{san,i}} = (S_{Ni} \cdot \mathrm{L}) \qquad (4)$$

Donde:

- S_N: Número de veces que la persona $i$usó el sanitario.
- L: litros por descarga

➔ Consumo estimado por persona en baños ($v_{i,\text{sanitario}}$):

$$\boldsymbol{HH_{i,\text{sanitario}}} = (\frac{\boldsymbol{V_{san,i}}}{\mathrm{Ne}}/1000 \qquad (5)$$

Donde:

- $HH_{i,\text{sanitario}}$: Huella hídrica por uso sanitario por visitante
- N_e: Visitantes encuestados total

3.3.5 Huella hídrica por uso de lavamanos ($\mathbf{v_{i,Lavamanos}}$)

Para el cálculo se tomó en cuenta el flujo de agua por llave haciendo un promedio entre los dos tipos de llaves existentes, se obtuvieron caudales de 7.5 y 3.5 L/min, respectivamente. Debido a que no se contó con mediciones directas del caudal durante el levantamiento, para la estimación se utilizó un caudal teórico promedio de 5.5 L/min, multiplicado por el promedio de tiempo que cada individuo deja correr el agua (Cuadro 9), el cual se multiplico por el número de veces promedio

que un usuario hace uso del lavamanos (Cuadro 10) y finalmente se multiplica por el número total de usuarios encuestados:

$$\boldsymbol{v_{i,\text{Lavamanos}}} = FA * T * U_L * N_e \qquad (6)$$

Donde:

- FA: Flujo de agua promedio por llave en minutos
- T: Tiempo promedio del flujo de agua
- UL: Numero de usos del lavamanos

3.3.6 Huella hídrica total por usuario según su consumo de sanitario, lavamanos y agua potable promedio ingerida:

El volumen directo asociado con cada visitante se obtuvo mediante la suma de los componentes identificados, $\boldsymbol{HH_{i,\text{sanitario}}}$ y $\boldsymbol{v_{i,\text{Lavamanos}}}$

$$\boldsymbol{HHusuario} = HH_{i,\text{sanitario}} + v_{i,\text{Lavamanos}} \qquad (7)$$

Donde :

- $HH_{usuario}$: Huella hídrica total por usuario según su consumo de sanitario, lavamanos y agua potable promedio ingerida:

3.3.7 Huella hídrica total por fin de semana del consumo de sanitario, lavamanos y agua potable ingerida por cada usuario (HHfs):

Para obtener los resultados por fin de semana (HHfs), se obtuvo un promedio del número de visitantes $(\overline{N})$ de cada fin de semana, del informe técnico proporcionado y con ello se calculó la (HHfs).

$$\overline{N} = \sum \text{visitantes por fin de semana en servicio/fines de semana en servicio}$$

$$\mathbf{HHfs} = (\text{HHusuario} * \overline{\text{N}})/1000 \qquad (8)$$

3.3.8 Huella hídrica anual (HHanual)

Al tener HHfs y tomarla como muestra, para obtener un estimado o proyección anual (HH_{anual}) se utilizaron los cálculos siguientes:

$$\mathbf{HHanual} = N_{fA} * HHfs \quad (9)$$

Donde

N_{fA}= Numero de fines de semana en un año

3.3.9 Evaluación de huella hídrica por water footprint

De manera complementaria se utilizó la calculadora Water Footprint para obtener una aproximación a la huella hídrica individual asociada con los hábitos generales de consumo de los visitantes encuestados.

La metodología para obtener los resultados en water footprint se dividió en dos procedimientos distintos, en el primero se introdujeron los datos en la página al mismo tiempo de encuestar a los usuarios y recopilar la información de manera digital en una base de datos Excel, obteniendo el valor de HH del usuario en el momento de ser entrevistado. El procedimiento numero 2 se realizaron las encuestas registrando de igual manera los datos en Excel y la evaluación de cada HH se efectuó al termino de todas las entrevistas, esto por motivos de priorización de tiempo.

3.4 Validación de datos

Con el fin de garantizar la coherencia en la información empleada para los cálculos, los datos obtenidos a través de las encuestas fueron recopilados y estructurados en una base de datos destinada a su posterior análisis y procesamiento. Las respuestas relacionadas específicamente con el consumo de agua en el PELT fueron revisadas considerando las unidades de medida utilizadas, la frecuencia de uso reportada para cada servicio y la correspondencia entre las variables necesarias para las estimaciones.

Las encuestas se aplicaron de manera anónima, siendo la participación voluntaria por parte de los visitantes. Opcionalmente, los encuestados podían consignar su nombre y firma en formularios físicos como constancia de la realización del cuestionario. La información proporcionada por los visitantes se complementó con datos operativos y técnicos facilitados por el personal del PELT,

asimismo, los registros de afluencia proporcionados por el PELT se emplearon de manera independiente a las respuestas de los encuestados, para estimar el número de visitantes por fin de semana.

Debido a que la selección de los participantes fue de carácter voluntario y no probabilístico, este procedimiento no valida estadísticamente la representatividad de la muestra. En consecuencia, los resultados se interpretan como estimaciones aproximadas del consumo directo de agua por parte de los visitantes durante el periodo analizado, sin considerar una representatividad estadística de la totalidad de los usuarios del PELT.

3.5 Resultados

Huella hídrica directa por visitante

Si **HH_{azul}** es:

$$HH_{AZUL} = \sum (\text{Extracción de agua} - \text{Flujo de retorno}) \qquad (10)$$

Donde: Flujo de retorno=0

$$HH_{AZUL} = = \sum (50{,}000 - 0) \qquad (11)$$

Entonces :

$$\boldsymbol{HHu} = \left(\frac{50{,}000\text{L}}{2{,}859} \right)/1000 = \boldsymbol{0.01748\ m^3/fin\ de\ seman/por\ visitante} \quad (\boldsymbol{12})$$

A partir de la información operativa proporcionada por el PELT, se consideró un volumen aproximado de 50,000 L de agua utilizado durante cada periodo de operación de fin de semana. Los registros de afluencia fueron de 3,618 y 2,100 visitantes para los dos periodos analizados, respectivamente, obteniéndose una afluencia promedio de 2,859 visitantes.

Bajo el supuesto de que el flujo de retorno es igual a cero, el volumen utilizado se consideró como consumo de agua azul para efectos de la estimación. Al dividir los 50,000 L entre la afluencia promedio de 2,859 visitantes se obtuvo una huella

hídrica azul directa estimada de 17.49 L/visitante, equivalente a 0.01749 m³/visitante.

Este enfoque resulta particularmente útil en espacios recreativos, donde la demanda de agua está relacionada no solamente con la infraestructura disponible, sino también con el número de personas que utilizan los servicios. En este sentido, Gössling et al. (2012) señalan que la demanda de agua asociada con actividades turísticas y recreativas depende de factores como la infraestructura, los servicios disponibles y la intensidad de uso. Asimismo, Hadjikakou et al. (2013) destacan la importancia de distinguir los usos directos de agua relacionados con las actividades de los visitantes y las condiciones particulares del lugar donde ocurre el consumo.

Este resultado representa una estimación promedio de la cantidad de agua utilizada por el PELT en relación con la afluencia de visitantes durante los periodos analizados. Debido a que el volumen de 50,000 L incluye diferentes usos operativos, como sanitarios, lavamanos, limpieza y otros servicios, el indicador debe interpretarse como una aproximación de la huella hídrica azul directa asociada con la operación del parque por visitante y no exclusivamente como el consumo individual realizado directamente por cada usuario.

Huella hídrica del consumo de agua potable por persona

Cuadro 7 Elaboración propia con datos de encuestas realizadas en el PELT

Dentro del parque ¿Cuanta agua toma aparte de la de los bebederos?																									
USUARIO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
RESPUESTA	2	2	1	2	2	1	1	1	2	1.5	0	0.5	1	2.5	2	1	0.7	1	2	1	0.5	0.5	1	2	2
USUARIO	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
RESPUESTA	0.5	1	1	0.5	1.5	1	1	1	1	2.5	2	1	1	0.5	1	1.5	1.5	2.5	2	2	1	1	1	1	2
PROMEDIO																									**1.304**

$$\bar{v} = \left[\frac{1}{50}(65.2)\right] \qquad (13)$$

$$\bar{v} = 1.3\ \boldsymbol{Litros\ por\ usuario}$$

El consumo promedio de agua potable reportado por los visitantes fue de 1.304 L por persona durante su estancia. Sin embargo, los participantes indicaron que este volumen correspondía principalmente a agua llevada desde sus hogares o adquirida fuera del parque, mientras que no se reportó consumo procedente de los bebederos del PELT.

Huella hídrica por uso sanitario

Cuadro 8 Litros ocupados en el uso de sanitario por cada usuario

HH por uso de sanitarios.																									
Usuario	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**
SN	1	1	1	1	3	2	2	2	3	3	4	2	2	5	5	3	2	2	3	1	2	1	1	2	3
Litros por descarga	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Litros ocupados	4	4	4	4	12	8	8	8	12	12	16	8	8	20	20	12	8	8	12	4	8	4	4	8	12
Usuario	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**	**41**	**42**	**43**	**44**	**45**	**46**	**47**	**48**	**49**	**50**
SN	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	3	1	1	3	1	2	1	1
Litros por descarga	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Litros ocupados	4	8	4	4	8	4	4	8	4	4	4	4	4	4	4	8	4	12	4	4	12	4	8	4	4
TOTAL																									**364**

Elaboración propia con datos de encuestas realizadas en el PELT e informe técnico facilitado por el personal del PELT

$$\mathbf{HH_{i,sanitario}} = (\frac{1}{50}(364))/1000 = 0.00728\mathrm{m}^3/\mathbf{dia/\ por\ usuario\ )} \qquad (14)$$

Los resultados de las encuestas muestran que los 50 visitantes reportaron en conjunto 91 usos del sanitario, equivalentes a un promedio de 1.82 usos por visitante durante su estancia. Considerando un volumen de 4 L por descarga, proporcionado por personal del PELT, el consumo promedio estimado por este concepto fue de 7.28L/ Visitante.

Este resultado muestra la relación existente entre la afluencia y la demanda de agua, debido a que el volumen utilizado en este servicio aumenta conforme se incrementa el número de usuarios y la frecuencia con la que hacen uso de las instalaciones.

Huella hídrica por uso de lavamanos

Cuadro 9 Tiempo promedio de flujo de agua por usuario

Tiempo promedio de flujo de agua																									
USUARIO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
T	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
USUARIO	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
T	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
PROMEDIO	**0.146**																								

Elaboración propia con datos de encuestas realizadas en el PELT

Cuadro 10 Uso de lavamanos por usuario

USUARIO	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**
UL	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	5	3	3	5	4	3	2	3	3	2	3	3	1	3	3
USUARIO	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**	**41**	**42**	**43**	**44**	**45**	**46**	**47**	**48**	**49**	**50**
UL	2	2	2	2	2	2	1	3	1	1	2	2	1	1	2	3	1	3	2	1	3	2	2	2	2
PROMEDIO	**2.32**																								

Elaboración propia con datos de encuestas realizadas en el PELT

Cuadro 12 Huella hídrica individual de los visitantes encuestados estimada mediante la calculadora Water FootprintElaboración propia con datos de encuestas realizadas en el PELT

$$v_{i,Lavamanos} = (5.5\ \mathrm{L/min}) * (0.146\ \mathrm{min\ promedio}) * (2.32 \mathrm{usos\ promedio}) = 1.8\mathrm{L\ por\ usuario} \quad (\mathbf{15})$$

En el caso de los lavamanos, los visitantes reportaron un tiempo promedio de apertura de la llave de 0.146 min por uso, equivalente aproximadamente a 8.76 segundos, y una frecuencia promedio de 2.32 usos por visitante. Considerando el caudal teórico promedio de 5.5 L/min establecido en la metodología, el consumo estimado fue de 1.8 Litros por visitante

Huella hídrica total por usuario según su consumo de sanitario, lavamanos y agua potable ingerida:

Considerando únicamente los dos componentes directamente abastecidos por el parque que hemos podido identificar mediante las encuestas, entonces :

$$\mathrm{HHusuario} = 7.28\ \mathrm{L} + 1.8\ \mathrm{L} \quad (16)$$

$$\mathrm{HHusuario} = 9.08\ \mathrm{L} \quad (17)$$

$$\mathrm{HHusuario} = 0.00908 \mathrm{m}^3/\mathrm{usuario} \quad (18)$$

El resultado se expresó en m^3 por usuario por visita (L/visitante/visita), permitiendo identificar tanto el consumo directo promedio como la participación relativa de cada componente.

Mientras que el indicador operativo de HH_{Azul} fue de 17.49 L/visitante, equivalente a 0.01749 m³/Usuario, entonces esto significa que, bajo nuestros supuestos, los usos de sanitario y lavamanos identificados mediante las encuestas explicarían aproximadamente 51.91 % del volumen operativo promedio por visitante. El resto equivalente al 48.08% corresponde al volumen que no puede asignarse mediante las variables individuales de la encuesta y que puede estar relacionado con limpieza y otros usos operativos incluidos dentro de los 50,000 L

Huella hídrica total por fin de semana del consumo de sanitario, lavamanos y agua potable ingerida por cada usuario (HHfs):

$$\tilde{N} = [(3{,}618 + 2{,}100)/2] = 2{,}859 \text{ Personas (p)} \quad (19)$$

$$\mathbf{HHfs} = (9.08\text{L} * 2{,}859\text{P})/1000 \quad (20)$$

$$\mathbf{HHfs = 25.95 m^3/fin\ de\ semana} \quad (\mathbf{21})$$

Como indicador complementario, el volumen estimado mediante las encuestas se contrastó con el volumen operativo de agua reportado por el PELT, correspondiente aproximadamente a 50,000 L por periodo de operación. Debido a que este volumen incluye usos adicionales, como actividades de limpieza y otros servicios, se consideró como referencia del consumo operativo del parque y no como equivalente directo de la huella hídrica individual de los visitantes.

Huella hídrica anual (HH anual)

En conjunto, la proyección anual confirma que el uso recreativo del parque genera una demanda sostenida de agua, cuya magnitud está directamente relacionada con los servicios de higiene y el comportamiento de los usuarios.

$$\mathbf{HHanual} = 52 * 25.95\text{m}^3 \quad (22)$$

$$\mathbf{HHanual = 1{,}349.4 m^3/año} \quad (\mathbf{23})$$

Este valor debe entenderse como una proyección anual bajo condiciones estables, y no como el consumo anual medido del PELT, ya que se derivó a partir del volumen operativo reportado en los períodos analizados. Dado que la afluencia de visitantes y las necesidades operativas pueden variar a lo largo del año, el consumo real podría diferir de esta estimación.

Evaluación de huella hídrica por water footprint

Cuadro 11 Huella hídrica individual de los visitantes encuestados estimada mediante la calculadora Water Footprint

Huella Hídrica por usuario - water footprint										
USUARIO	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
UL	2514	1391	2841	2899	1732	933	1174	3894	1297	1512
USUARIO	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
UL	1366	1725	5025	4611	718	3831	3366	1352	2467	1744
USUARIO	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
UL	1523	1624	2336	2187	2873	2783	1687	1788	1915	2273
USUARIO	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**
UL	3300	3432	1679	2618	1570	2439	1769	2644	1389	2129
USUARIO	**41**	**42**	**43**	**44**	**45**	**46**	**47**	**48**	**49**	**50**
UL	2984	2656	1782	2892	1805	2632	2024	2177	2109	2063
TOTAL										**113,474**
PROMEDIO										**2,269.48**

Elaboración propia con datos de Wáter Footprint por encuestas realizadas en el PELT

Los valores obtenidos presentaron una variación importante entre usuarios; la suma de los resultados de las 50 observaciones fue de 113,474 unidades y el promedio fue de 2,269.48 unidades por usuario, de acuerdo con la unidad reportada por la herramienta utilizada

De los resultados del cuadro 11, se obtuvo una huella hídrica promedio de 2,269.5 litros anuales por usuario. Este dato debe interpretarse de manera independiente de la huella hídrica azul directa estimada para el PELT, dado que la calculadora considera hábitos de consumo que van más allá de la visita al parque, incluyendo aspectos relacionados con la alimentación y diversos usos domésticos del agua. En cambio, el indicador estimado para el PELT se limita al volumen asociado únicamente con la operación del espacio recreativo y los servicios utilizados durante la estancia.

Disposición a pagar

Cuadro 12 Disposición a pagar

Por los servicios que da el parque si se pusiera una tarifa de entrada ¿cuanto estaria dispuesto a pagar? Nada, $5-$10, otra																								
Visitante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Disposición a pagar $	50	50	50	50	35	40	40	30	40	50	100	50	0	50	100	20	20	10	50	40	50	30	10	30	25
Visitante	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Disposición a pagar $	50	50	30	10	40	5	10	50	30	50	15	10	50	15	20	25	40	0	30	50	10	15	15	40	40

Elaboración propia con datos de Wáter Footprint por encuestas realizadas en el PELT

Los valores declarados se encontraron entre $0 y $100 por visitante. La disposición promedio a pagar fue de $34.40, mientras que el valor señalado con mayor frecuencia fue $50, mencionado por 15 visitantes, equivalentes al 30 % de los encuestados. Asimismo, ocho personas (16 %) indicaron $40 y seis (12 %) señalaron $30. En conjunto, estos resultados muestran una disposición positiva al pago entre la mayoría de los visitantes encuestados.

3.6 Discusión

Huella hídrica directa por visitante

Este enfoque resulta particularmente útil en espacios recreativos, donde la demanda de agua está relacionada no solamente con la infraestructura disponible, sino también con el número de personas que utilizan los servicios. En este sentido, Gössling et al. (2012) señalan que la demanda de agua asociada con actividades turísticas y recreativas depende de factores como la infraestructura, los servicios disponibles y la intensidad de uso. Asimismo, Hadjikakou et al. (2013) destacan la importancia de distinguir los usos directos de agua relacionados con las actividades de los visitantes y las condiciones particulares del lugar donde ocurre el consumo.

Este resultado representa una estimación promedio de la cantidad de agua utilizada por el PELT en relación con la afluencia de visitantes durante los periodos analizados. Debido a que el volumen de 50,000 L incluye diferentes usos operativos, como sanitarios, lavamanos, limpieza y otros servicios, el indicador debe interpretarse como una aproximación de la huella hídrica azul

directa asociada con la operación del parque por visitante y no exclusivamente como el consumo individual realizado directamente por cada usuario.

Por esta razón, aunque este resultado permite caracterizar las necesidades de hidratación de los visitantes durante su estancia, el volumen no se incorporó a la estimación del consumo directo atribuible al abastecimiento de agua del PELT.

Huella hídrica del consumo de agua potable por persona

Debido a que el volumen no se reportó como un consumo procedente de los bebederos del PELT, aunque este resultado permite caracterizar las necesidades de hidratación de los visitantes durante su estancia, el volumen no se incorporó a la estimación del consumo directo atribuible al abastecimiento de agua del PELT.

Huella hídrica por uso sanitario

Considerando el número promedio de usos registrados por los encuestados, el consumo total estimado por persona alcanzó valores que representan entre el 45% y el 55% de la huella hídrica individual, de esta manera, el uso de sanitarios representa uno de los principales componentes del consumo directo de agua asociado con los servicios utilizados por los visitantes.

Huella hídrica por uso de lavamanos

Aunque el volumen estimado para lavamanos fue menor que el correspondiente a los sanitarios, este componente representa un uso frecuente durante la estancia de los visitantes. Su consumo depende tanto del caudal de los dispositivos como del tiempo durante el cual permanece abierta la llave, por lo que constituye un componente sobre el cual pueden implementarse medidas de eficiencia relacionadas con las características de los dispositivos y con los hábitos de uso

Huella hídrica total por usuario según su consumo de sanitario, lavamanos y agua potable ingerida:

Esta diferencia muestra la importancia de distinguir entre el consumo directamente relacionado con el comportamiento de los visitantes y el volumen requerido para mantener en funcionamiento la infraestructura recreativa. Por lo tanto, la afluencia de visitantes genera no solamente consumos individuales asociados con el uso de los servicios, sino también una demanda indirectamente vinculada con las actividades necesarias para mantener la operación del espacio.

La contribución del lavamanos representa aproximadamente entre el 25% y el 35% de la huella hídrica por persona, lo cual refleja que, aunque más breve, el uso es frecuente y acumulativo.

Huella hídrica total por fin de semana del consumo de sanitario, lavamanos y agua potable ingerida por cada usuario (HHfs)

La expresión del resultado en L/visitante (20) permite relacionar el volumen de agua utilizado con la afluencia del parque y facilita la comparación entre periodos con diferente número de usuarios. En este sentido, un aumento en la afluencia no necesariamente implica que el indicador por visitante aumente en la misma proporción, debido a que una parte del volumen utilizado corresponde a actividades operativas que pueden mantenerse aun cuando cambie el número de usuarios.

Huella hídrica anual (HHanual)

La magnitud de la huella hídrica azul no debe interpretarse únicamente a partir del volumen estimado. Hoekstra et al. (2012) destacan que la evaluación de la huella hídrica azul adquiere mayor pertinencia cuando se relaciona con la disponibilidad de agua azul y los requerimientos ambientales de la cuenca. En este sentido, el PELT se encuentra dentro de una región donde los recursos hídricos subterráneos presentan condiciones de presión, particularmente en el acuífero Texcoco. Por ello, aun cuando el volumen estimado para la operación recreativa del parque sea menor en comparación con otros usos regionales del agua, su análisis permite identificar oportunidades de eficiencia y manejo del recurso dentro de un contexto de disponibilidad limitada.

Desde esta perspectiva, el indicador no solamente permite cuantificar el volumen asociado con la operación del parque, sino que proporciona una referencia para evaluar posteriormente cambios en el consumo derivados de modificaciones en la infraestructura, la afluencia o las prácticas de manejo del agua.

Evaluación de huella hídrica por water footprint

Ambos indicadores representan límites de sistema y escalas temporales diferentes, por lo que no conviene compararlos directamente en términos de magnitud. Sin embargo, la utilización de la calculadora resulta útil como información complementaria, ya que permite entender que la huella hídrica de una persona no depende únicamente del agua utilizada directamente durante una actividad recreativa, sino también de sus patrones generales de consumo.

Disposición a pagar

De los 50 visitantes encuestados, 48 manifestaron una disposición positiva a pagar, lo que representa el 96 % de la muestra, mientras que únicamente un 4 %, indicaron que no estarían dispuestas a realizar algún pago.

3.7 Conclusiones

La estimación realizada permitió obtener una aproximación de la huella hídrica azul directa asociada con la operación del Parque Ecológico Lago de Texcoco y con los servicios utilizados por sus visitantes. A partir del volumen operativo aproximado de 50,000 L por periodo de funcionamiento y una afluencia promedio de 2,859 visitantes, se estimó una huella hídrica azul directa de 17.49 L/visitante, equivalente a 0.01749 m^3/visitante, bajo el supuesto de un flujo de retorno igual a cero. Dentro de los usos de agua relacionados directamente con los visitantes el sanitario presentó el mayor consumo de los componentes evaluados, con un promedio estimado de 7.28 L/visitante, mientras que el uso de lavamanos representó aproximadamente 1.8 L/visitante. En conjunto, ambos componentes explicaron aproximadamente 51.91 % del volumen operativo promedio estimado por visitante

Los resultados muestran que el consumo de agua asociado con un espacio recreativo no depende únicamente de las acciones individuales de los usuarios, sino también de los requerimientos necesarios para mantener en funcionamiento la infraestructura y los servicios. Por esta razón, el indicador de 17.49 L/visitante constituye una referencia que puede utilizarse para dar seguimiento al comportamiento del consumo de agua del PELT y evaluar posteriormente los cambios relacionados con la afluencia, la infraestructura o la implementación de medidas de ahorro.

Por otra parte, de manera independiente a estos cálculos por componente, se utilizó la plataforma Water Footprint para estimar la huella hídrica individual de los visitantes a partir de la información recabada en las encuestas. Este procedimiento arrojó una huella hídrica promedio de 2,269.5 litros por usuario al año, de acuerdo con los resultados mostrados en el Cuadro 11, por lo que podemos decir que la porción de huella hídrica atribuible específicamente a la visita al parque resulta marginal cuando se compara con la huella hídrica total asociada al estilo de vida del individuo, lo cual coincide con la literatura que señala que los consumos recreativos suelen representar proporciones menores frente a los usos domésticos, alimentarios o productivos.

El resultado de la información económica obtenida mediante la pregunta de disposición a pagar también permitió identificar que dentro de la muestra estudiada, existe aceptación hacia la posibilidad de realizar una contribución económica por los servicios proporcionados por el parque. En futuras investigaciones podría evaluarse de manera específica la disposición a pagar por acciones relacionadas con el manejo eficiente del agua, como el mantenimiento de dispositivos ahorradores, el tratamiento y reúso de aguas residuales o mejoras en la infraestructura hídrica.

Limitaciones.

Finalmente, los resultados obtenidos deben interpretarse considerando las limitaciones del estudio. La muestra estuvo integrada por 50 visitantes

seleccionados de manera voluntaria y no probabilística durante dos fines de semana, por lo que los resultados no representan estadísticamente a la totalidad de usuarios del PELT. Asimismo, algunos parámetros utilizados en las estimaciones, como el caudal promedio de los lavamanos y el supuesto de flujo de retorno igual a cero, se establecieron a partir de la información disponible y no mediante mediciones directas durante el periodo de levantamiento. Por ello, los resultados representan una aproximación a la huella hídrica azul directa durante el periodo analizado. Futuras investigaciones podrían incorporar mediciones directas de los caudales, registros de consumo por tipo de servicio, cuantificación de los flujos de retorno, un mayor número de observaciones y diferentes periodos del año, con el propósito de mejorar la precisión de las estimaciones y analizar las variaciones temporales en el consumo de agua

3.8 Literatura citada

- Arboleda-Tabares, D. A., Talero, J. E. R., Pérez, S. A. Q., & Rodríguez, C. A. A. (2022). The water footprint as an educational strategy for the responsible consumption of water at the Santiago de Cali University [La huella hídrica como estrategia educativa para el consumo responsable del agua en la Universidad Santiago de Cali]. *Estudios Pedagógicos, 48*(2), 131–158. https://doi.org/10.4067/S0718-07052022000200131
- Canteiro, M., Prado, B., Fernández, T., y Zambrano, L. (2025). La relación entre los espacios verdes urbanos, los acuíferos someros y la disponibilidad de agua para las ciudades: Un estudio de caso en la Ciudad de México. PLOS Water, 4(4), e0000324. https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000324
- Cepeda Loya, M. S. (2019). *Estimación de la huella hídrica del turismo en el municipio de Los Cabos* [Tesis de maestría, El Colegio de México]. https://hdl.handle.net/20.500.11986/COLMEX/10001854
- Comisión Nacional del Agua. (s. f.). *Proyecto Ecológico Lago de Texcoco*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/proyecto-ecologico-lago-de-texcoco
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Water Footprint Network.

- Ortega Guerra, M. A. (2023). *Cálculo de huella hídrica para organismos operadores de agua potable* [Tesis de maestría, Universidad de Guanajuato].
- Pan, L., Zhao, Y., y Zhu, T. (2023). Estimación del riego de espacios verdes urbanos en 286 ciudades de China: Implicaciones para el uso del suelo urbano y la gestión del agua. Sustainability. https://doi.org/10.3390/su15108379
- Parque Ecológico Lago de Texcoco. (2025). *Informe técnico sobre el suministro, consumo de agua y afluencia de visitantes en el Deportivo del Parque Ecológico Lago de Texcoco (PELT)* [Documento interno no publicado]. Administración del PELT.
- Quintana, D. (2025). *Encuesta y datos para huella hídrica PELT* [Archivo de Excel no publicado].
- Talavera-Dávila, H. V. (2018). La huella hídrica en la estructura urbana: El centro tradicional de Bogotá. *Bitácora Urbano Territorial, 28*(3), 157–170. https://doi.org/10.15446/bitacora.v28n3.67713
- Young, R. A. (2015). *Determining the economic value of water: Concepts and methods*. Routledge.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES

La presente investigación permitió evaluar la huella hídrica azul directa asociada a las visitas de los usuarios al Parque Ecológico Lago de Texcoco (PELT). El análisis de las encuestas facilitó una caracterización más detallada de los usos relacionados directamente con los visitantes. Los resultados indican que la interpretación de la huella hídrica azul no debe limitarse únicamente al volumen cuantificado; Hoekstra et al. (2012) destacan que su análisis resulta más relevante cuando se relaciona con la disponibilidad de agua azul y las necesidades ambientales en la cuenca. De manera similar, Pellicer-Martínez y Martínez-Paz (2016) argumentan que la utilidad del indicador de huella hídrica como herramienta de sostenibilidad aumenta al considerar el consumo en el contexto de la disponibilidad del recurso. Este análisis resulta particularmente relevante para el PELT, dado su ubicación en el Valle de México y el contexto hídrico específico del acuífero de Texcoco.

Los resultados de esta investigación no permiten afirmar que el consumo de PELT sea responsable de las condiciones de presión existentes en el acuífero Texcoco, ni determinar su contribución directa a dichas condiciones. Sin embargo, sí permiten identificar una demanda de agua vinculada a la operación de un espacio recreativo en una región donde la disponibilidad del recurso es un elemento fundamental para su gestión. Por lo tanto, el indicador de 17.49 L/visitante puede servir como referencia inicial para evaluar futuros cambios en el consumo relacionados con la afluencia, la infraestructura o la implementación de medidas de eficiencia.

La gestión del agua dentro del parque podría fortalecerse mediante el seguimiento periódico de los volúmenes utilizados y su diferenciación entre sanitarios, lavamanos, limpieza y otros servicios. Gössling (2015) señala que los indicadores de desempeño hídrico pueden contribuir a identificar oportunidades de ahorro, mientras que Styles et al. (2015) muestran que la desagregación de los consumos facilita la identificación de áreas donde pueden implementarse medidas de eficiencia. En el PELT, esto podría complementarse con mediciones directas de los caudales, la evaluación de dispositivos ahorradores y la cuantificación de las aguas residuales generadas.

La medición de los flujos de retorno es fundamental para optimizar futuras estimaciones del balance hídrico. En el presente estudio, se asumió un flujo de retorno nulo debido a la insuficiencia de datos disponibles para cuantificar el volumen de agua que regresa tras su utilización, por ello, el valor obtenido debe interpretarse considerando este supuesto metodológico. La adquisición futura de información relacionada con procesos de tratamiento y reúso permitirá mejorar la precisión en la determinación del balance hídrico del parque y actualizar de manera más exacta la estimación de su huella hídrica azul.

De manera complementaria, los resultados de disposición a pagar incorporaron una dimensión económica al análisis. De los 50 visitantes encuestados, 48 manifestaron una disposición positiva a pagar por los servicios proporcionados por el parque, equivalente al 96 % de la muestra, con un promedio declarado de

$34.40 por visitante. Este resultado no constituye una valoración económica del agua ni permite establecer una tarifa óptima de acceso, debido a que la pregunta estuvo dirigida de manera general a los servicios del PELT , no obstante, representa un antecedente para futuras investigaciones que podrían evaluar específicamente la disposición a pagar por medidas relacionadas con conservación, eficiencia hídrica, tratamiento o reúso del agua. Tian et al. (2020) señalan que este tipo de información puede contribuir a conocer la valoración que los usuarios realizan de los espacios verdes y de los servicios que reciben de ellos.

Finalmente, la principal aportación de esta investigación consiste en establecer una primera aproximación cuantitativa de la huella hídrica azul directa asociada con los visitantes y la operación del PELT. El valor obtenido no debe considerarse como una cifra definitiva, sino como una referencia que podrá actualizarse conforme se disponga de mayor información. Las principales limitaciones se relacionan con la aplicación de 50 encuestas mediante un muestreo voluntario y no probabilístico durante dos fines de semana, la utilización de algunos parámetros técnicos sin mediciones directas y el supuesto de un flujo de retorno igual a cero. Futuras investigaciones podrían ampliar los periodos de muestreo, realizar mediciones directas de los diferentes usos, cuantificar los flujos de retorno y evaluar escenarios de ahorro, tratamiento y reúso. De esta manera, la huella hídrica puede utilizarse como una herramienta de seguimiento que contribuya a mejorar la eficiencia y fortalecer la gestión sostenible del agua dentro del PELT.

CAPÍTULO 5. LITERATURA CITADA

- Gössling, S. (2015). New performance indicators for water management in tourism. Tourism Management, 46, 233–244. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2014.06.018
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E., & Richter, B. D. (2012). Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability. PLOS ONE, 7(2), e32688. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032688

- Pellicer-Martínez, F., & Martínez-Paz, J. M. (2016). The water footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level. Science of the Total Environment, 571, 561–574. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.022
- Styles, D., Schoenberger, H., & Galvez-Martos, J. L. (2015). Water management in the European hospitality sector: Best practice, performance benchmarks and improvement potential. Tourism Management, 46, 187–202. https://doi.org/10.1016/j.tourman.2014.07.005
- Tian, Y., Wu, H., Zhang, G., Wang, L., Zheng, D., & Li, S. (2020). Perceptions of ecosystem services, disservices and willingness-to-pay for urban green space conservation. Journal of Environmental Management, 260, 110140. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110140