



**Universidad  
de Guanajuato**

**UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
CAMPUS GUANAJUATO**

Guanajuato, Gto., a 19 de febrero de 2026

**DR. GILBERTO CARREÑO AGUILERA**  
Director de la División de Ingenierías  
Campus Guanajuato  
Universidad de Guanajuato  
Presente

Por la presente deseo informar que he leído y aprobado la tesis de la alumna de la Maestría en Ciencias del Agua, Ana Paula Cadena Plazas, con NUA 193217, la cual lleva por título “Dinámica de abastecimiento de agua en la ciudad de Guanajuato capital y su impacto en la huella hídrica”, bajo la dirección de quien suscribe este documento. Misma que ha sido revisada por el comité sinodal asignado y corregida por la alumna. Por lo cual, considero que la versión adjunta está terminada y no tendrá modificaciones.

De antemano le agradezco la atención.

**A T E N T A M E N T E**  
“LA VERDAD OS HARÁ LIBRES”

**Dra. Xítlali Virginia Delgado Galván**

**PTC del Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica**

C.c.p. Para el interesado.

División de Ingenierías, Campus Guanajuato. Juárez 77, Centro. Guanajuato, Gto. Tel: +52 4731020100. E-mail: xdelgado@ugto.mx



UNIVERSIDAD DE  
GUANAJUATO

**DINÁMICA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA  
CIUDAD DE GUANAJUATO CAPITAL Y SU IMPACTO EN  
LA HUELLA HÍDRICA**

---

**Ana Paula Cadena Plazas**

Trabajo de Grado Para Optar al Título de

**Maestra en Ciencias del Agua**

Directora:

**Dra. Xitlali Virginia Delgado Galván**

**Universidad de Guanajuato**

**2026**

## Agradecimientos

*A Dios, por guiar mi camino y darme la fortaleza necesaria para culminar esta etapa de mi formación académica.*

*A mis padres, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios, que han sido fundamentales para alcanzar este logro. A mi hermano y a mi abuelita, por su cariño, confianza y palabras de aliento en cada momento.*

*A mis amigos y colegas, por acompañarme a lo largo de este proceso, compartir conocimientos, experiencias y hacer más llevadero el camino.*

*A la Dra. Xitlali Delgado, por su orientación, comprensión, apoyo y valiosas aportaciones durante el desarrollo de este trabajo.*

*A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, por el otorgamiento de la beca que hizo posible la realización de mis estudios de posgrado.*

*A la Universidad de Guanajuato, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y crecer profesionalmente.*

*Al organismo operado SIMAPAG, por proporcionar la información necesaria para el desarrollo de esta investigación.*

*A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.*

## Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	12
1.1	Planteamiento del problema.....	13
1.2	Hipótesis.....	14
1.3	Objetivos.....	14
1.3.1	Objetivo General .....	14
1.3.2	Objetivos particulares.....	15
1.4	Justificación.....	15
2.	Antecedentes.....	18
2.1	Estudios de la HH en contextos urbanos.....	19
2.2	Estudios de la HH en México.....	21
2.2.1	Dinámica del abastecimiento urbano y su relación con la HH como indicador para su evaluación .....	23
2.3	Estrategias de gestión hídrica.....	24
2.3.1	Aumentar la eficiencia física del sistema .....	25
2.3.2	Aplicación de campañas de concientización.....	25
2.3.3	Consideraciones sobre el desazolve de presas como alternativa de gestión .....	26
3.	Marco teórico .....	30
3.1	HH como Indicador de Sostenibilidad Hídrica Global .....	30
3.1.1	Metodología para el cálculo de la HH según la Water Footprint Network .....	32
3.2	Abastecimiento de agua en Guanajuato .....	35

3.3	Ciclo hidrológico urbano .....	36
3.3.1	Eficiencia en la Gestión de la Distribución de Agua en Organismos Operadores	38
3.4	Legislación y políticas públicas.....	39
3.4.1	Ley de Aguas Nacionales (LAN, 1992) .....	40
3.4.2	Normas Oficiales Mexicanas (NOM) .....	40
3.4.3	Normativa estatal y municipal.....	42
4.	Marco metodológico .....	43
4.1	Alcance de la investigación .....	43
4.2	Recolección de datos.....	43
4.3	Descripción de la metodología.....	44
4.4	Zona de estudio.....	45
4.4.1	Localización geográfica .....	45
4.4.2	Clima.....	46
4.4.3	Hidrología.....	46
4.5	Estimación de la evaporación mediante imágenes satelitales .....	50
5.	Resultados .....	52
5.1	Patrones de consumo urbano (2019–2024) .....	52
5.1.2	Análisis de consumo por tarifas .....	59
5.2	Estimación de la evaporación en las presas .....	63
5.3	Caracterización estacional (meses húmedos vs. secos) .....	65
5.4	Cálculo de la HHAD.....	66

5.5	Escenarios de gestión.....	78
5.5.1	Estimación del ahorro monetario bajo escenarios de gestión para el año 2024	85
6.	Recomendaciones.....	90
7.	Discusión.....	91
8.	Conclusiones.....	94
	Bibliografía.....	96

## Lista de figuras

Figura 1. Componentes de la HH, tomado de (Arjen Y. Hoekstra et al., 2021) ....	32
Figura 2. Cuatro fases de la evaluación de la HH, tomado de (Arjen Y. Hoekstra et al., (2021).....	32
Figura 3. Mapa de ubicación del municipio de Guanajuato y el acuífero Silao-Romita. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 4. Ubicación de la subcuenca del río Guanajuato .....	47
Figura 5. Ubicación de las presas que abastecen Guanajuato capital.....	48
Figura 6. Ubicación de la batería de pozos de Puente de las Puentes .....	49
Figura 7. Abastecimiento de las fuentes a las zonas de la ciudad .....	49
Figura 8. Distribución de consumo mensual en m <sup>3</sup> . Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	53
Figura 9. Nombre y ubicación de los 35 sectores hidráulicos de Guanajuato capital. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	56
Figura 10. Distribución porcentual del consumo sectorial. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	57
Figura 11. Consumo total por sector (m <sup>3</sup> /año) en Guanajuato capital del 2019-2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	58
Figura 12. Consumo de L/toma en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	59
Figura 13. Participación porcentual de cada tarifa en el consumo anual total. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	60
Figura 14. Consumo de la tarifa doméstica (L/toma/día) en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	61
Figura 15. Consumo de la tarifa Comercial y servicios (L/toma/día) en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.....	62

Figura 16. Consumo de la tarifa Mixta (L/toma/día) en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	63
Figura 17. Comparación con el NDWI del área del espejo en las presas en un mes seco y húmedo respectivamente, del año 2024. Fuente: Elaboración propia .....	63
Figura 18. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2019. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	68
Figura 19. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2020. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	70
Figura 20. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2021. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG. ....	71
Figura 21. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2022. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG. ....	72
Figura 22. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2023. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG. ....	73
Figura 23. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	75
Figura 24. Relación de HHAD con la precipitación en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.....	76
Figura 25. Relación de HHAD a nivel mensual con la precipitación en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.....	77

Figura 26. Relación de HHAD normalizada a nivel mensual con la precipitación en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

..... 78

### Lista de tablas

Tabla 1. Definición de los colores de la HH.....	31
Tabla 2. Principales Normas Oficiales Mexicanas (NOM) sobre la gestión del agua .....	41
Tabla 3. Consumo total mensual en m <sup>3</sup> en el periodo de estudio. Datos obtenidos de SIMAPAG.....	52
Tabla 4. Consumo l/hab/día mensual en el periodo de estudio con datos obtenidos de SIMAPAG.....	54
Tabla 5. Número de tomas contratadas cada año. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	55
Tabla 6. Estimación de la evaporación mensual de la presa de Mata en m <sup>3</sup> . Elaboración: Fuente propia con los datos obtenidos del SMN.....	64
Tabla 7. Estimación de la evaporación mensual de la presa de la esperanza en m <sup>3</sup> . Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SMN.....	64
Tabla 8. Estimación de la evaporación mensual de la presa de la soledad en m <sup>3</sup> . Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del SMN.....	64
Tabla 9. Caracterización <i>de la precipitación</i> entre meses húmedos y secos (mm), siendo azul y rojo respectivamente. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del SMN .....	66
Tabla 10. HHAD para el 2019. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.....	67

Tabla 11. HHAD para el 2020. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.....	69
Tabla 12. HHAD para el 2021. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.....	70
Tabla 13. HHAD para el 2022. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.....	71
Tabla 14. HHAD para el 2023. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.....	73
Tabla 15. HHAD para el 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.....	74
Tabla 16. Escenario 1 para reducir HHAD con valores del 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	79
Tabla 17. Escenario 2 para reducir HHAD con valores del 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	81
Tabla 18. Escenario 3 para reducir HHAD con valores del 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	83
Tabla 19. Comparación de la HHAD total bajo los escenarios evaluados respecto al año 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.....	85
Tabla 20. Volúmenes anuales por fuente. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	86
Tabla 21. Costos anuales para la extracción subterránea del 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	86
Tabla 22. Costos por m <sup>3</sup> de la extracción subterránea. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	86
Tabla 23. Ahorros volumétricos por escenario. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG .....	87

Tabla 24. Ahorro total por escenario de la extracción subterránea (MXN/año).  
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG ..... 87

Tabla 25. Variación mensual de la HHAD en los meses de mayor y menor demanda, bajo escenarios de gestión hídrica. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG ..... 89

## Resumen

La ciudad de Guanajuato capital enfrenta un contexto de presión hídrica creciente debido a la alta dependencia del agua subterránea proveniente del acuífero Silao-Romita y a la variabilidad estacional de las precipitaciones, que condiciona la disponibilidad de fuentes superficiales. En este estudio se evalúa la Huella Hídrica Azul Directa (HHAD) del sistema de abastecimiento urbano durante el periodo 2019–2024, integrando los volúmenes de extracción subterránea y superficial, las pérdidas por evaporación en presas y la caracterización estacional de meses húmedos y secos.

Los resultados muestran que la HHAD presenta una marcada variabilidad intra anual, con valores máximos en los meses secos, particularmente marzo y abril, donde se alcanzaron picos mensuales cercanos a 1,030,000 m<sup>3</sup> (2022) y 990,000 m<sup>3</sup> (2020), mientras que durante la temporada húmeda (julio–septiembre) se registraron los valores más bajos, con promedios de entre 830,000 y 860,000 m<sup>3</sup>, coincidiendo con la mayor disponibilidad superficial y recarga de embalses. A escala interanual, se observó que los años con menor precipitación tienden a presentar mayor HHAD, reflejando una mayor presión sobre las extracciones subterráneas y un incremento en las pérdidas por evaporación.

Adicionalmente, se identificaron sectores con altos consumos y eficiencias físicas reducidas como los principales contribuyentes a la HHAD, lo que permitió plantear escenarios de gestión orientados a reducir la presión hídrica mediante mejoras en eficiencia física y reducción de consumo. En conjunto, el análisis evidencia que la HHAD es un indicador útil para comprender la vulnerabilidad del abastecimiento urbano ante la variabilidad climática y para orientar estrategias de gestión que reduzcan la dependencia del acuífero sobreexplotado y mejoren la sostenibilidad del sistema.

## 1. Introducción

El agua es uno de los recursos naturales esenciales para la vida, el bienestar humano y el desarrollo económico. Sin embargo, su disponibilidad enfrenta crecientes amenazas debido a factores como el crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y el cambio climático (UNESCO, 2023). En México, donde aproximadamente el 79% de la población reside en áreas urbanas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019), las ciudades se han convertido en focos de intensa presión sobre los recursos hídricos. Esta situación es crítica en regiones con alta variabilidad climática y disponibilidad limitada de agua, como el estado de Guanajuato.

La sobreexplotación de acuíferos es una de las problemáticas más apremiantes en la región. De acuerdo con la actualización de la CONAGUA (2023), 13 de los 18 acuíferos principales de la región presentan un déficit en su disponibilidad media anual. El caso del acuífero Silao-Romita, responsable del abastecimiento de agua subterránea de Guanajuato Capital, registra una disponibilidad media anual positiva de 105.04 hm<sup>3</sup>, aunque bajo una fuerte presión por un volumen de extracción que asciende a 166.94 hm<sup>3</sup> anuales. Esta dependencia casi estructural de las fuentes subterráneas ha generado un desequilibrio entre la demanda y la disponibilidad del recurso, exacerbado por la estacionalidad de las lluvias y la creciente variabilidad climática. En los años secos, el abastecimiento depende predominantemente de pozos, mientras que en los años húmedos las presas logran complementar el suministro (INEGI, 2022). La ciudad de Guanajuato capital, reconocida por su valor histórico y cultural, enfrenta una realidad alarmante en términos de abastecimiento de agua. Esta dinámica variable incide directamente en la Huella Hídrica (HH) de la ciudad, afectando la sostenibilidad del sistema hídrico local.

En este contexto, el análisis de la Huella Hídrica Azul (HHA), es decir, el volumen de agua dulce extraída de fuentes superficiales y subterráneas para uso humano se

presenta como una herramienta clave para evaluar el impacto del consumo de agua en el entorno natural (Hoekstra et al., 2011). A través de esta metodología es posible, no solo cuantificar el uso del recurso, sino también identificar patrones temporales de consumo y áreas críticas de presión hídrica. En Guanajuato capital, donde alrededor del 70% del agua proviene de acuíferos (CONAGUA, 2016), la evaluación de la HH se vuelve particularmente relevante para orientar estrategias de gestión sostenible.

Los impactos del cambio climático, expresados en el aumento de eventos de sequía prolongada y la reducción de la recarga natural de acuíferos (IPCC, 2023), agravan aún más este panorama. Estudios previos han demostrado que durante los meses secos la HH puede incrementarse hasta un 30% en sectores como el agrícola, debido a la mayor necesidad de riego (Hoekstra et al., 2011). Por tanto, un análisis desagregado de la HH, a escala mensual y diferenciando entre fuentes superficiales y subterráneas, es una herramienta indispensable para entender la dinámica del consumo y diseñar respuestas adaptativas.

### **1.1 Planteamiento del problema**

La gestión sostenible del recurso hídrico en México se ha visto comprometida por el aumento de la demanda, los cambios en el clima y el uso intensivo de las fuentes disponibles. En México la concentración de la población en centros urbanos intensifica la demanda de recursos hídricos, especialmente en regiones semiáridas como Guanajuato, donde la disponibilidad de agua es limitada (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021) y la sobreexplotación de acuíferos junto con la insuficiencia de fuentes superficiales han generado un déficit hídrico que compromete el abastecimiento doméstico y restringe el desarrollo socioeconómico. Este déficit no solo afecta la calidad de vida de los habitantes, sino que también limita el desarrollo económico y social de la ciudad (Martínez & Patiño, 2012).

Se prevé que para el año 2050, la demanda de agua en las ciudades aumentará en un 80% (UNESCO, 2023a), lo que representa un desafío para la gestión sostenible del agua, considerando que la disponibilidad del recurso es limitada.

La ciudad de Guanajuato capital, enfrenta variaciones en la disponibilidad de agua debido a cambios climáticos y a la estacionalidad de lluvias. La HHA permite cuantificar el volumen de agua extraída de fuentes naturales y utilizada en actividades humanas, facilitando la identificación de áreas críticas de consumo y la implementación de estrategias para reducir el uso del recurso (Hoekstra et al., 2011). El análisis de la HH es una herramienta que permite conocer de mejor manera la presión ejercida sobre las fuentes de abastecimiento y su variabilidad en el tiempo, lo que facilitará el desarrollo de estrategias para su gestión sostenible.

## **1.2 Hipótesis**

Analizar el consumo de agua de las fuentes superficiales y subterráneas permitirá evaluar la dinámica de abastecimiento y establecer los impactos en el cálculo de la HH para la ciudad de Guanajuato.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

- Evaluar la HH del sistema de abastecimiento de agua en Guanajuato capital durante el periodo 2019-2024, analizando las variaciones en el uso de fuentes superficiales y subterráneas en función de la disponibilidad hídrica de las presas y la dependencia de los pozos.

### 1.3.2 Objetivos particulares

- Identificar y describir las fuentes de agua utilizadas para el abastecimiento de la ciudad, incluyendo presas y pozos, analizando sus características técnicas y operativas.
- Cuantificar la HH para cada año del periodo 2019-2024 y comparar los resultados en función de la disponibilidad hídrica, diferenciando entre años secos y húmedos.
- Evaluar el impacto del uso de fuentes subterráneas y superficiales en la HH de la ciudad, considerando su contribución a la HHAD.
- Proponer estrategias de gestión hídrica.

### 1.4 Justificación

La evaluación de la HH en la ciudad de Guanajuato capital es un indicador esencial para comprender la dinámica del uso del agua en un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos, especialmente bajo la influencia de variaciones climáticas estacionales. La HH, definida como el volumen total de agua dulce utilizado para producir bienes y servicios (Hoekstra et al., 2011), es mayor en años secos debido a la alta dependencia de fuentes subterráneas, lo que incrementa el consumo de agua y exacerba el estrés hídrico en los acuíferos (Marston & Konar, 2017).

El análisis de la HH a nivel mensual es relevante en Guanajuato capital debido a la marcada estacionalidad de las precipitaciones en la región, que se concentran principalmente entre junio y septiembre, mientras que los meses secos (octubre a mayo) dependen casi exclusivamente del acuífero Silao-Romita. Evaluar la HH mes a mes permite identificar patrones específicos de consumo en los sectores doméstico, comercial e industrial, así como detectar picos de demanda que incrementan la presión sobre los recursos subterráneos durante los meses secos. Comparar los meses húmedos con los secos proporciona una base para diseñar estrategias que optimicen el uso del agua

superficial cuando está disponible y reduzcan la dependencia de los acuíferos en periodos críticos.

Guanajuato capital enfrenta desafíos en la gestión de sus recursos hídricos, ya que depende en un 70% aproximadamente de los acuíferos para satisfacer las demandas de agua potable, agrícola e industria (CONAGUA, 2015). La sobreexplotación de los acuíferos en la cuenca Lerma-Chapala, donde se ubica la ciudad, ha generado un déficit hídrico anual de aproximadamente 1,000 millones de m<sup>3</sup>, con un descenso promedio de los niveles de agua subterránea de 1 a 2 metros por año (CONAGUA, 2021). Este escenario pone en riesgo la disponibilidad del recurso a mediano y largo plazo, afectando no solo el abastecimiento de agua, sino también la sostenibilidad de las actividades económicas y la calidad de vida de la población. Además, el cambio climático está intensificando la frecuencia y duración de las sequías en la región, lo que agrava el estrés hídrico y reduce la recarga natural de los acuíferos (IPCC, 2023). En este contexto, el análisis de la HH mensual no solo permite cuantificar el impacto del consumo de agua, sino también identificar oportunidades para mitigar la presión sobre los acuíferos mediante una gestión adaptativa que responda a las condiciones climáticas estacionales.

La importancia de este estudio radica en su capacidad para generar políticas de gestión hídrica basadas en evidencia científica que promuevan la sostenibilidad de los recursos hídricos en Guanajuato capital. El análisis de la dinámica de abastecimiento y los impactos en el cálculo de la HH proporciona datos clave para proponer medidas de gestión. Además, la comparación mensual permite priorizar intervenciones en los meses secos, como la regulación del uso de agua en actividades agrícolas intensivas y la promoción de prácticas de conservación en el sector doméstico. Estas medidas no solo pueden reducir la HH, sino que también fortalecen la resiliencia de la ciudad frente a los desafíos del cambio climático y la creciente demanda de agua.

Desde una perspectiva más amplia, este estudio tiene implicaciones significativas para la gestión hídrica a nivel regional y nacional. Guanajuato capital comparte características con otras ciudades mexicanas en zonas semiáridas, donde la sobreexplotación de acuíferos y la variabilidad climática son desafíos comunes (CONAGUA, 2021). Los resultados de esta investigación sirven como un modelo replicable para otras regiones, ofreciendo un marco metodológico para evaluar la HH y diseñar estrategias de gestión adaptadas a las condiciones locales. Asimismo, al alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), este estudio contribuye al avance de políticas públicas que promuevan el uso eficiente y equitativo del agua (UN, 2015). La generación de conocimiento sobre la HH también fomenta la colaboración entre actores gubernamentales, académicos y de la sociedad civil para abordar los retos hídricos de manera integral.

## 2. Antecedentes

La creciente escasez de agua mundial, intensificada por la rápida urbanización y el cambio climático, hace que la gestión sostenible del agua urbana sea necesaria para el desarrollo sostenible (Rosińska et al., 2024). Las ciudades, como centros concentrados de población y actividad económica, ejercen una presión considerable sobre los recursos hídricos, lo que exige una comprensión de sus patrones de consumo y contaminación del agua. La HH surge como un indicador crucial en este contexto, ofreciendo una evaluación del uso del agua dulce donde su principal enfoque es el consumo de agua y su contaminación.

En el contexto urbano, es fundamental distinguir entre el uso directo del agua y el uso virtual (o indirecto) del agua. El uso directo del agua se refiere al consumo de agua dulce y a la contaminación que se produce dentro de los límites geográficos de la ciudad. Abarca el agua suministrada con fines domésticos, industriales y ecológicos, así como el agua perdida por la ineficacia de las infraestructuras o evaporada de las superficies urbanas. El agua virtual, por el contrario, representa el agua incorporada a los bienes y servicios que se producen en otros lugares y se importan a la ciudad, o que se producen dentro de la ciudad y se exportan (Hoekstra et al., 2011).

El énfasis en el uso directo del agua en contextos urbanos es especialmente significativo para la gestión local de los recursos hídricos. Los municipios y los organismos operadores ejercen una influencia sustancial sobre el uso directo del agua a través de diversas intervenciones, como la aplicación de tarifas, la modernización de las infraestructuras hídricas y la organización de campañas públicas de concientización. Esta influencia directa contrasta con la poca influencia que suele haber sobre el uso del agua virtual, que depende en gran medida por las cadenas de suministro mundiales y las opciones de los consumidores en general. Por eso es importante enfocar esta

investigación en el uso directo del agua azul, y adaptarla al alcance donde las autoridades locales puedan tener un control de los patrones de consumo poblacional.

### **2.1 Estudios de la HH en contextos urbanos**

Alifujiang et al. (2024) realizaron un análisis del uso del agua urbana examinando 21 ciudades grandes chinas entre 2011 y 2020. Su estudio empleó la metodología de la HH junto con un modelo de desacoplamiento para evaluar la relación entre el crecimiento económico y el uso del agua. Definieron la HH interna como la suma de las extracciones de agua agrícola, industrial, doméstica y ecológica, restando las exportaciones de agua virtual. Un matiz clave de su planteamiento fue la definición del uso agrícola del agua como «demanda de agua por evaporación de los cultivos». Lo que encontraron es que hay diferencias entre regiones en cuanto al uso total del agua, sobre todo por las actividades industriales y agrícolas. Además, algo que llamó mucho la atención fue que, en muchos casos, cuanto más se usa el agua, menos desarrollo económico se ve, lo que sugiere que el agua no se está usando de manera eficiente en general.

A partir de una visión más detallada del concepto general de HH, Gong et al. (2023) desarrollaron un enfoque basado en la producción de 31 ciudades chinas, durante el período 2011-2016. Su estudio desglosó de manera precisa la HH azul, en tres categorías clave dentro del entorno urbano: usos domésticos, industriales y ecológicos. Uno de los hallazgos más destacados fue una reducción significativa en la HH total vinculada a la producción urbana, atribuida principalmente a una disminución notable en la huella de aguas grises, resultado de políticas más efectivas en la prevención de la contaminación hídrica. No obstante, también se identificaron tendencias preocupantes: aunque el uso industrial de agua azul se redujo ligeramente, la demanda en los sectores doméstico y ecológico aumentó, impulsada por los procesos de urbanización acelerada y las políticas de reverdecimiento urbano.

Por su parte, Fialkiewicz et al. (2018) exploraron los procesos físicos y las pérdidas vinculadas a las infraestructuras que conforman la HHAD, aportando una mirada más técnica y útil para la gestión del agua urbana. Propusieron un modelo simplificado para evaluar la HH azul en entornos urbanos, considerando tanto el uso doméstico como no doméstico. Aplicado en Breslavia, Innsbruck y Vicenza, el modelo desglosa la HH azul en seis componentes: evaporación desde superficies impermeables, evaporación de cuerpos de agua, pérdidas por calefacción/refrigeración, exportación de agua, fugas en la red y consumo directo o almacenamiento prolongado. Estos cálculos se basan en datos urbanos accesibles, como la precipitación media y la cobertura del suelo. El estudio evidenció que altas proporciones de superficies impermeables, como en Breslavia (61%) y Vicenza (69%), incrementan notablemente la HH azul, destacando la forma urbana como un factor clave en el consumo de agua azul.

Profundizando en la comprensión de las superficies impermeables como parte del componente azul de la HH, Manzardo et al. (2016) propusieron una metodología más refinada al desarrollar un enfoque modular y ascendente para evaluar la HHAD a nivel urbano. Esta propuesta adapta el marco conceptual de Hoekstra et al. (2011) al desagregar las áreas urbanas en “bloques constructivos” caracterizados por patrones homogéneos de uso del agua —por ejemplo, viviendas unifamiliares, oficinas, vialidades— lo cual permite diseñar intervenciones de gestión hídrica más específicas y, al mismo tiempo, superar limitaciones frecuentes en la disponibilidad de datos en contextos urbanos. La definición de HH azul adoptada por estos autores va más allá de las extracciones tradicionales, al incluir también el agua de lluvia que se evapora o infiltra en superficies impermeables sin llegar a recargar efectivamente la cuenca de origen. Este enfoque integral, basado en un balance de masas, considera tanto la entrada de agua dulce como la salida de aguas residuales, así como la dinámica del agua de lluvia sobre superficies

urbanas, subrayando el impacto significativo que tienen las áreas impermeables en el consumo efectivo de agua dentro del ciclo hidrológico.

Por último, el trabajo de Paterson et al. (2015) representa una revisión integral que sitúa en perspectiva las metodologías y hallazgos específicos abordados por otros autores, aportando una visión más amplia sobre el estado actual de los estudios de Huella Hídrica Urbana (HHU). Los autores destacan la importancia de incorporar tanto los flujos de agua directos (“reales”) como los indirectos (“virtuales”) en los análisis, reconociendo que esta doble dimensión resulta esencial para sustentar decisiones de planificación y políticas públicas en contextos urbanos, considerando el peso que las ciudades ejercen sobre los recursos hídricos a escala global. La comparación entre diversas metodologías —como la Evaluación de la HH, el modelo Input-Output Ampliado Ambientalmente y la Evaluación del Ciclo de Vida— permite visibilizar desafíos transversales, entre ellos, las frecuentes limitaciones en la disponibilidad de datos y la falta de coherencia en la delimitación de los sistemas analizados. Los autores señalan que la gestión hídrica urbana tiende a enfocarse en el denominado “balance hídrico de ingeniería”, que contempla elementos como el suministro de agua potable, las pérdidas por fugas en las redes de distribución y los procesos de tratamiento de aguas residuales. Finalmente, hace énfasis en que la falta de armonización entre datos provenientes de distintas dependencias (nacional, subnacional y local) es uno de los principales obstáculos para lograr análisis acordes y comparables.

## **2.2 Estudios de la HH en México**

El análisis de la HHU ha cobrado relevancia en el contexto mexicano debido a los crecientes desafíos relacionados con la gestión sostenible del agua en zonas urbanas. Diversos estudios han abordado esta problemática desde distintas perspectivas, lo que ha permitido construir una visión más integral del uso del agua en las ciudades y su evaluación a través del concepto de HH.

A partir de esto, Morales-Novelo & Rodríguez-Tapia (2020), proporcionan un marco más amplio al centrarse en la sostenibilidad de la HH dentro del contexto de una cuenca, específicamente el Valle de México. Dada la alta urbanización de esta cuenca, su análisis de la HH total (incluidas las aguas azules, verdes y grises) generada por todas las actividades dentro de la región informa directamente la comprensión de la HHU. Su énfasis en la sostenibilidad evalúa si la actual demanda urbana de agua está dentro de la capacidad regenerativa de los recursos de la cuenca, lo cual es crucial para la viabilidad a largo plazo del suministro urbano de agua y para orientar las estrategias de planificación urbana destinadas a reducir la huella global mediante la gestión de la demanda y la eficiencia de las infraestructuras. Se pasa así del concepto general de seguridad hídrica a los componentes detallados de la HH.

Centrándose más en el enfoque, Ramos-Bueno et al. (2024) abordan directamente el consumo urbano de agua en Ciudad de México, un componente clave de la HHAD. El uso que hacen de un modelo de panel espacial durante un periodo prolongado (2004-2022) proporciona una metodología basada en datos para comprender cómo evoluciona esta HH directa a lo largo del tiempo y cómo varía en las distintas zonas urbanas. Mediante el análisis de la dinámica espaciotemporal, su trabajo demuestra cómo identificar las zonas de alto o bajo consumo, lo que es vital para las intervenciones específicas en la gestión de la demanda de agua urbana. Este estudio ofrece un ejemplo concreto de cómo cuantificar y analizar la HHAD en una gran área metropolitana, proporcionando perspectivas metodológicas para la investigación.

La investigación de Esquivel Alcántara et al. (2024) sobre la Zona Metropolitana de Toluca profundiza en la HH residencial, donde cuantifican explícitamente la HH directa e indirecta del consumo doméstico en la Zona Metropolitana de Toluca. Sus hallazgos, como la comparación entre Toluca y Almoloya de Juárez, ofrecen datos concretos sobre las variaciones en el uso residencial del agua dentro de una aglomeración

urbana, destacando el impacto de los hábitos cotidianos sobre los recursos hídricos. Este estudio ofrece un desglose detallado de los componentes del uso residencial del agua, incluida el HHAD para las actividades domésticas.

El trabajo realizado por Shiguetomi (2016), ofrece una evaluación de la HH específicamente dentro de la vivienda residencial en San Luis Potosí, abarcando todo el ciclo de vida de una casa desde su construcción hasta su uso y demolición. Esta tesis indica que se debe tener en cuenta el consumo de agua durante la fase de construcción, que a menudo se pasa por alto y revela discrepancias entre las estimaciones teóricas y el uso real del agua. También pone de relieve las dificultades para medir con precisión el consumo de agua residencial, ya que las cifras encuestadas eran notablemente inferiores a las estimaciones oficiales. Esto proporciona un contexto para comprender las posibles lagunas de datos y el alcance total de la HHAD asociada a la vivienda urbana.

### **2.2.1 Dinámica del abastecimiento urbano y su relación con la HH como indicador para su evaluación**

En una evaluación integral del abastecimiento urbano se debe valorar la disponibilidad de recursos hídricos, ya sea en su variabilidad, las políticas de operación y la demanda urbana. La HH es un indicador que permite asociar las prácticas de consumo de las personas en lugares geográficos específicos con su impacto en los recursos hídricos, y se convierte en una herramienta importante, ya que permite comprender los vínculos entre las actividades productivas y la presión sobre los recursos hídricos para mejorar la gestión del agua.

Teniendo esto en cuenta, Parra-Orobio et al. (2023) evaluaron la HH y la sostenibilidad ambiental de un barrio de bajos ingresos, que carece de saneamiento y descarga aguas residuales sin tratar, adaptando la metodología de la HH para su uso en un contexto urbano de bajos ingresos y con escasez de datos, mediante la creación de una

herramienta de estimación basada en encuestas a hogares. Los resultados señalan la necesidad de fortalecer las capacidades de la comunidad y cambiar los comportamientos relacionados con el uso del agua, promoviendo prácticas de conservación del agua y el uso de dispositivos eficientes.

En Chile, se realizó la contabilidad de HH a 15 Regiones (Jaramillo, 2017), y los resultados muestran que las regiones centrales tienen huellas más altas debido a la concentración de actividades productivas y población, también resaltan que la Huella Hídrica Azul (HHA) se observa alta dependencia a fuentes subterráneas y se mostró que la metodología de HH permitió caracterizar el consumo y la contaminación del recurso hídrico por regiones y sectores productivos, mostrando grandes contrastes según actividad económica y zona geográfica.

En el ámbito nacional, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Pedrozo Acuña (2022) indica que es necesaria una gestión del agua territorial, que tome en cuenta la posibilidad de detonar crisis hídricas regionales como resultado de malas decisiones al no considerar la alta variabilidad en el clima y en las condiciones del territorio, destacando la importancia de indicadores como la HH para medir la escasez del agua y resaltando la necesidad de aplicar estos indicadores localmente.

### **2.3 Estrategias de gestión hídrica**

La adaptación urbana al cambio climático incluye aumentar el suministro garantizado de agua y reducir la demanda urbana de agua. La reducción de la extracción de agua urbana mejora parámetros como la cantidad de agua disponible en cuerpos de agua, la resiliencia frente a la sequía, el ahorro energético y la poca necesidad de usar productos químicos (Díaz-Cano et al., 2025).

### **2.3.1 Aumentar la eficiencia física del sistema**

En Turquía Akdeniz (2022) realizó un estudio para aumentar la eficiencia física en la red hídrica implementando estrategias como la sustitución masiva de medidores de agua antiguos por modelos nuevos más precisos, implementación de un control activo de fugas, control reactivo de fugas, respondiendo a notificaciones de los usuarios y reparando fugas visibles, monitoreo y análisis integrado de datos mediante el sistema SCADA, división del sistema en áreas hidráulicamente aisladas, pruebas de presión para verificar el aislamiento hidráulico de zonas y actualizar datos en sistemas GIS, campaña de actualización de datos y análisis coordinado de todos los departamentos implicados, permitiendo una gestión integral. Los resultados mostraron que la tasa de pérdidas de agua en el área bajó un 17% tras las intervenciones y como resultado financiero, los ingresos de la empresa de agua aumentaron un 16%.

En Chile se realizó un estudio para reducir las fugas, implementando un sistema de gestión de presión en la válvula reductora de presión existente que abastece a La Calera, una ciudad afectada por la sequía, lo que logró un 10.12% y concluyen que la gestión de la presión facilita un rápido ahorro de agua al optimizar el rendimiento de las válvulas reductoras de presión existentes (Ortega-Ballesteros et al., 2022).

### **2.3.2 Aplicación de campañas de concientización**

Al haber una reducción del agua disponible, principalmente debido a la reducción de las precipitaciones, es importante realizar campañas de concientización a la población. En Italia, Morbidelli et al. (2025) realizaron un estudio con una muestra de unidades participantes ubicadas en zonas urbanas donde se cuantificó el consumo normal de agua per cápita. Posteriormente, se dieron instrucciones sobre cómo ahorrar agua durante diversos usos en el hogar y se volvió a evaluar el consumo doméstico durante un periodo adicional de tres semanas. Se observó una tasa media de ahorro de agua del +17.20 %, señalaron que las campañas de concientización, cuando se diseñan con mensajes

apropiados y contextualmente relevantes, pueden ser una herramienta eficaz, rápida y relativamente económica para enfrentar la escasez en el corto plazo (Morbidelli, 2025).

Por otra parte, (Katz et al., 2016) realizaron un experimento de campo controlado en Israel durante una sequía. El estudio contó con 1,000 hogares divididos aleatoriamente en un grupo de tratamiento y un grupo de control. El primero recibió campañas informativas para fomentar el uso responsable del agua, mientras que el segundo no fue intervenido. El consumo de agua se monitoreó diariamente por seis meses usando medidores automáticos, permitiendo comparar cambios reales. La campaña logró reducir el consumo doméstico del grupo de tratamiento en un 7.6 % durante las cinco semanas posteriores, alcanzando una reducción máxima del 10 % en comparación con el grupo de control.

### **2.3.3 Consideraciones sobre el desazolve de presas como alternativa de gestión**

El proceso de desazolve se utiliza para recuperar el almacenamiento perdido en una presa por los depósitos de sedimentos. Sin embargo, al momento de la práctica presenta desventajas económicas, ambientales, sociales y políticas que hacen que sea inviable e incluso sea mejor la construcción de una nueva presa (Palmieri et al., 2003), lo que limita su viabilidad como solución de gestión hídrica.

#### *2.3.3.1 Implicaciones económicas*

Frente a alternativas como el manejo de cuenca y la reducción de la erosión en origen, el desazolve presenta con frecuencia una relación costo-beneficio desfavorable. A escala mundial, la eliminación de los sedimentos acumulados en los embalses conlleva importantes costos económicos, que alcanzan los 21,000 millones de dólares al año en todo el mundo, lo que supone aproximadamente el 37 % de los costos totales de mantenimiento, que se estiman en 57,000 millones de dólares al año, entre los gastos se

incluye la movilización de equipos y los costos de eliminación. Cuanto más pequeño es el proyecto, mayor será el costo de movilización como porcentaje de los costos totales. (Smith et al., 2013).

Los costos de excavación y transporte pueden acercarse al de construir una nueva presa, el gasto de disposición del material sedimentario suele ser muy elevados para grandes embalses el volumen de sedimento a extraer supera la capacidad de los equipos existentes y se necesitarían décadas de trabajo, lo que hace inviable la opción desde el punto de vista financiero (Palmieri et al., 2003).

### *2.3.3.2 Implicaciones ambientales*

Desde el punto de vista ambiental, se distinguen sedimentos gruesos y finos en función de su comportamiento y de su papel ecológico en los sistemas fluviales. En particular, los sedimentos finos (limo y arcilla) constituyen una fuente natural de turbidez, por consiguiente, cualquier alteración en su régimen natural puede impactar significativamente la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos (Kondolf et al., 2014). En este contexto, cualquier intervención que implique la movilización de sedimentos almacenados en presas requiere evaluaciones ambientales específicas, dado el potencial de afectar procesos ecológicos sensibles.

Estudios como el de Lee et al. (2022) señalan que la alteración del régimen sedimentario puede afectar la estabilidad del cauce, la conectividad fluvial y los ecosistemas acuáticos, incrementando incluso el riesgo de inundaciones y de impactos aguas abajo. De igual manera, la remoción de sedimentos puede provocar afectaciones directas a las comunidades biológicas y sus hábitats, suspensión de metales pesados y deterioro temporal de la calidad del agua, lo que obliga a implementar medidas de mitigación complejas y ambientalmente costosas (Bianchini et al., 2019). Al respecto, Eggleton & Thomas, (2004) plantean que las perturbaciones en los sedimentos alteran

propiedades químicas fundamentales, como el potencial redox (Eh) y el pH, procesos que aceleran la movilización y biodisponibilidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Según esta perspectiva, la desorción y partición de compuestos dependen de las características específicas del sedimento y del contaminante en cuestión. Los investigadores subrayan, además, que persisten vacíos significativos en la comprensión científica sobre los procesos cinéticos que regulan la liberación de metales y compuestos organometálicos durante eventos de resuspensión, lo que añade una capa de incertidumbre técnica a la evaluación de estos impactos.

### *2.3.3.3 Implicaciones sociales*

Desde una perspectiva social se ha observado que las intervenciones en presas suelen enfrentar resistencias sociales, conflictos por el uso del territorio y tensiones políticas, especialmente cuando afectan de manera directa a comunidades locales o alteran regímenes de operación previamente establecidos. La oposición comunitaria hacia el desazolve aumenta cuando se perciben daños a los cuerpos de agua o impactos negativos en las zonas bajas. Estos factores pueden dificultar la realización del proyecto (Domínguez, 2019).

(Fox et al., 2016) sostienen que la eliminación de represas en paisajes históricamente transformados, como Nueva Inglaterra, trasciende lo estrictamente ambiental para convertirse en un fenómeno de ecología política donde la historia, la identidad y la estética de las comunidades locales generan un profundo apego a los entornos represados. Mediante el análisis de las contingencias geográficas y las micropolíticas de la región, el estudio demuestra que los conflictos por la restauración surgen de interpretaciones divergentes sobre la ciencia y el paisaje, especialmente en una transición de usos industriales a valores recreativos o consuntivos. En última instancia,

la investigación concluye que cualquier proyecto de restauración en paisajes "largamente humanizados" debe integrar las dimensiones culturales y políticas junto a las ecológicas, reconociendo que la intervención humana histórica redefine las prioridades y las tensiones en la gestión de los recursos naturales.

#### *2.3.3.4 Implicaciones políticas e institucionales*

El desazolve genera descargas masivas de sedimento que afectan a usuarios río abajo, lo que obliga a negociaciones con autoridades locales, comunidades y la aprobación regulatoria puede retrasarse o bloquearse (Palmieri et al., 2003). La decisión de desazolvar se inserta en un contexto de escaso presupuesto y de decisiones fragmentadas entre autoridades federales y estatales, lo que dificulta la planificación y genera controversia política (Domínguez, 2019). Bajo este escenario, los conflictos por el desazolve pueden entenderse como disputas dentro de "territorios hidrosociales", definidos como configuraciones espaciales donde convergen personas, instituciones, flujos hídricos y tecnología bajo una disputa por el control del agua. Boelens et al., (2016) sostienen que la política territorial se manifiesta cuando diversos actores con intereses geográficos y políticos divergentes compiten por imponer sus propias estrategias de construcción de territorio. Así, las disputas no se limitan únicamente al acceso a los recursos naturales, sino que constituyen luchas profundas sobre los significados, normas, conocimientos, identidad y autoridad que definen la gestión del entorno biofísico.

### 3. Marco teórico

#### 3.1 HH como Indicador de Sostenibilidad Hídrica Global

La HH es un concepto introducido por Hoekstra (2003) definido como un indicador del uso de agua dulce que considera tanto el uso directo como indirecto de agua por parte de un consumidor o productor. Este indicador incorpora una perspectiva de uso consuntivo, lo que significa que cuantifica el volumen de agua que se evapora, se incorpora a un producto, se desvía a otra cuenca o se contamina y, por lo tanto, deja de estar disponible para otros usos en la cuenca de origen (Chapagain & Hoekstra, 2011). El término agua virtual fue propuesto por Anthony Allan (1998) para describir el comercio indirecto de agua a través del intercambio de productos agrícolas y manufacturados. Este concepto evolucionó hacia la HH, que ofrece una visión más completa del impacto del consumo sobre los recursos hídricos. El uso de la HH añade una nueva dimensión al concepto integrado de sostenibilidad. Puede percibirse como un análogo de la huella ecológica y de carbono, pero indica el uso del agua en lugar de la tierra o la energía fósil (Elmogahzy, 2020). Este indicador permite identificar los impactos sobre los recursos hídricos causados por los hábitos de consumo de grupos de población en localizaciones geográficas específicas. De esta manera, los resultados orientan a la apropiación de conceptos básicos por parte de grupos sociales, llevando a una transformación de prácticas cotidianas asociadas al recurso hídrico (Cerón-Hernández et al., 2020).

La idea se consolidó con el desarrollo de metodologías para su cálculo y la publicación del Manual de Evaluación de la HH, estableciendo un estándar global para su medición y análisis (Hoekstra et al., 2011). Este concepto fue desarrollado para comprender mejor la relación entre el consumo humano y la disponibilidad de recursos hídricos, permitiendo una gestión más sostenible del agua. La HH tiene tres componentes (Tabla 1), que sumados, son la HH total, estos representan el uso y la calidad del agua.

Tabla 1. Definición de los colores de la HH

<b>Tipo de HH</b>	<b>Definición</b>
<b>HH azul</b>	Se refiere al consumo de aguas superficiales y subterráneas a lo largo de la cadena de suministro de un producto o servicio. El consumo implica la pérdida de masa de agua disponible en una zona de captación, ya sea por evaporación, incorporación al producto o traslado a otra cuenca o al mar.
<b>HH verde</b>	Se refiere al consumo de agua de lluvia almacenada en el suelo como humedad.
<b>HH gris</b>	Se refiere al volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes, esto en función de los estándares de calidad del agua. Representa el agua requerida para diluir contaminantes y mantener la calidad del agua dentro de límites aceptables.

El uso directo del agua alude al consumo y contaminación realizados por el usuario final, como el agua utilizada en el abastecimiento doméstico, industrial o agrícola local. Por el contrario, el uso indirecto del agua comprende el agua utilizada en las cadenas de suministro de los bienes y servicios que una persona o entidad consume. Este enfoque permite evaluar de forma integral la presión sobre los recursos hídricos, tanto dentro como fuera de la región analizada (Hoekstra et al., 2011). El agua analizada en el presente estudio se define como Huella Hídrica Azul Directa (HHAD), correspondiente a la intersección entre el uso directo del agua y el componente azul de la huella hídrica, tal como se muestra en la Figura 1.

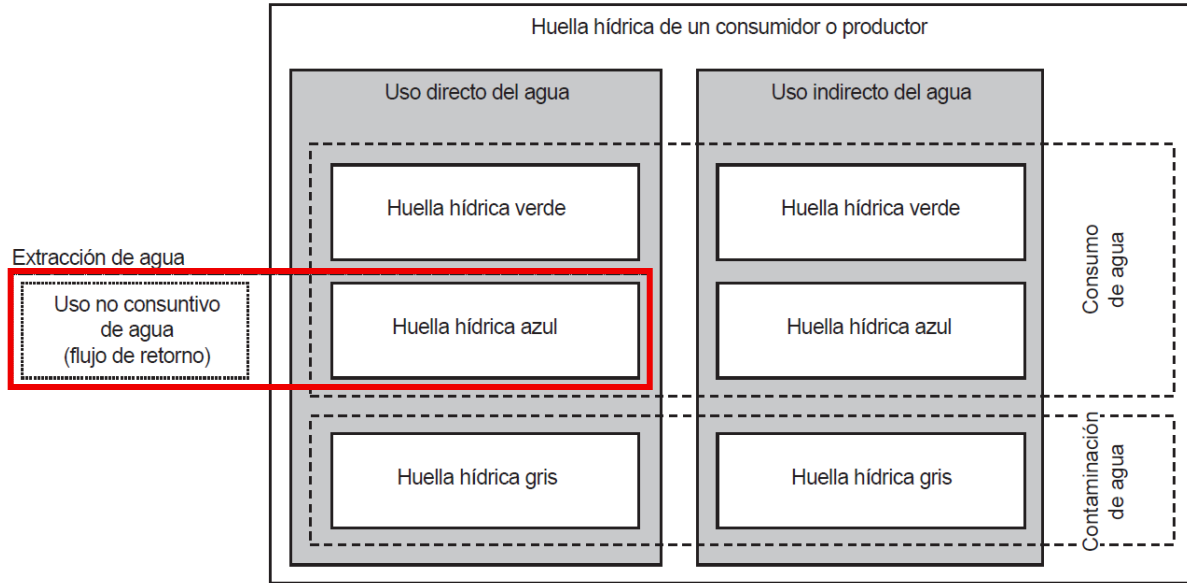


Figura 1. Componentes de la HH, tomado de (Arjen Y. Hoekstra et al., 2021)

### 3.1.1 Metodología para el cálculo de la HH según la Water Footprint Network

El análisis de la HH se estructura en cuatro fases claramente definidas, como se observa en la figura 2, las cuales permiten una evaluación completa, transparente y reproducible del uso consuntivo de agua y sus impactos asociados. Estas fases fueron establecidas por la Water Footprint Network en el Manual de Evaluación de la HH (Hoekstra et al., 2011) y constituyen el marco metodológico estándar para cualquier evaluación de la HH.

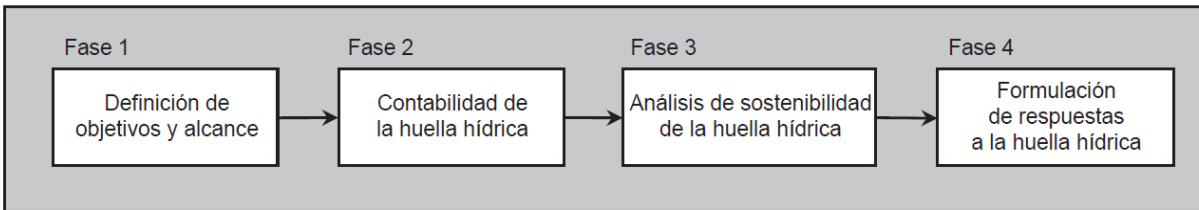


Figura 2. Cuatro fases de la evaluación de la HH, tomado de (Arjen Y. Hoekstra et al., (2021)

### **Fase 1: Establecimiento de los objetivos y alcance del estudio**

En esta primera fase se define el propósito de la evaluación de la HH, el objeto de estudio (producto, proceso, empresa, individuo, cuenca o nación), la escala espacial y temporal, y el tipo de HH a evaluar (azul, verde, gris o una combinación de estas). También se establecen los criterios de evaluación de sostenibilidad y los indicadores clave. Dado que las hipótesis y premisas de cálculo están condicionadas por la escala seleccionada, resulta fundamental delimitar con precisión el alcance del estudio, especificando claramente las inclusiones y exclusiones. De este modo se garantiza que los resultados sean transparentes.

Para un estudio a escala municipal, se puede delimitar el análisis a una cuenca hidrográfica o a los límites político-administrativos del municipio, en un periodo representativo.

### **Fase 2: Contabilidad de la HH**

Esta fase comprende el cálculo cuantitativo de la HH, es decir, la estimación de los volúmenes de agua utilizados y contaminados a lo largo del ciclo de vida de un producto o en las actividades de una región. Este cálculo se desagrega por tipo de agua.

Dado que el volumen de agua extraída no es el mismo que el volumen de agua consumida, el uso consuntivo del agua según la definición de la WFN se refiere a cualquiera de los siguientes casos:

1. El agua se evapora.
2. El agua se incorpora a un producto.
3. El agua no se devuelve a la misma cuenca de la que se extrajo o se devuelve al mar.
4. El agua no se devuelve en el mismo periodo, por ejemplo, se extrae en un periodo de escasez de agua y se devuelve en un periodo húmedo.

La contabilidad puede realizarse a diferentes niveles: por producto, por proceso, por unidad económica o por territorio. Para evaluaciones territoriales, se suman los valores de todos los sectores y actividades que operan dentro del área de estudio.

### **Fase 3: Evaluación de sostenibilidad**

En esta fase, la HH cuantificada se evalúa en el contexto de la disponibilidad y el estrés hídrico local. No basta con saber cuánta agua se usa, sino si ese uso es sostenible en el largo plazo. Se compara la HH con los umbrales de disponibilidad de agua dulce en la cuenca o acuífero de origen. Esta evaluación considera:

- **Sostenibilidad Ambiental:** Es fundamental evaluar si la extracción de agua azul supera la tasa de recarga natural de los acuíferos o la capacidad de regeneración de las fuentes superficiales. Asimismo, resulta necesario considerar si la carga de contaminantes que absorbe la HH gris es compatible con los estándares de calidad del agua establecidos. El concepto de escasez de agua es central aquí, implicando que el uso de agua excede la disponibilidad renovable (Hoekstra & Mekonnen, 2012).
- **Sostenibilidad Social y Económica:** Es importante analizar cómo el uso del agua afecta a las poblaciones locales y a la equidad en el acceso a este recurso vital. Además, debe considerarse la existencia de conflictos derivados de su distribución y disponibilidad, los cuales pueden intensificarse en contextos de escasez o de gestión inadecuada. Esta fase permitirá analizar si la HH directa del abastecimiento de Guanajuato, especialmente durante los meses secos, es ambientalmente sostenible dado el contexto de sobreexplotación del acuífero Silao-Romita (Caldera Ortega & Tagle Zamora, 2020).

### **Fase 4: Formulación de respuestas**

Finalmente, se proponen acciones para reducir la HH y mejorar su sostenibilidad. Estas pueden incluir medidas tecnológicas (uso eficiente del agua), cambios en patrones

de consumo, ajustes normativos o mecanismos de compensación hídrica. En el contexto de la planificación territorial, también puede implicar la priorización de sectores estratégicos y la restricción de actividades intensivas en agua en zonas vulnerables.

### **3.2 Abastecimiento de agua en Guanajuato**

La HH se determina a través del consumo de agua en una región, lo que equivale al agua que se encuentra en el conjunto de bienes y servicios requeridos por individuos y empresas que habitan en dicha zona, independientemente de si estos fueron generados dentro de una zona geográfica específica o fuera de ella (Morales-Novelo & Rodríguez-Tapia, 2020).

Guanajuato se abastece tanto de fuentes superficiales como de subterráneas; sin embargo, hay una dependencia significativa del agua subterránea, puesto que el 72 % del agua utilizada para uso público urbano proviene de acuíferos (Domínguez, 2022). El Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guanajuato (SIMAPAG) es el organismo responsable de la gestión de las fuentes de abastecimiento, cuya operación integra pozos y fuentes superficiales, específicamente las presas de La Soledad, La Esperanza y Mata. La disponibilidad de agua de estas fuentes está directamente ligada al régimen de lluvias y a la capacidad de almacenamiento. Un factor crítico para considerar en la HH azul de estas fuentes es la evapotranspiración desde la superficie del embalse, que representa una pérdida directa y consuntiva de agua almacenada. La estimación de la evapotranspiración de cuerpos de agua se puede realizar mediante métodos basados en balances energéticos o ecuaciones empíricas que utilizan datos meteorológicos (Allen et al., 1998), y es fundamental para una contabilidad precisa del agua azul disponible en el sistema.

En las fuentes subterráneas, obtienen agua de una batería de pozos ubicada en Puenteillas, la cual está compuesta por un sistema de 22 pozos. El acuífero Silao-Romita,

del cual se extrae una parte significativa del suministro de la ciudad, se encuentra en estado de sobreexplotación. Presenta un déficit de 120 millones de metros cúbicos de agua al año, posicionándose como el quinto acuífero con mayor sobreexplotación en el estado de Guanajuato, lo que ha provocado un descenso en los niveles freáticos y un aumento en los costos de extracción (Caldera Ortega & Tagle Zamora, 2020).

La variabilidad climática, caracterizada por años secos y húmedos, tiene un impacto significativo en la disponibilidad de agua. En años húmedos, las presas se llenan y la disponibilidad de agua superficial es alta. Por el contrario, en años secos, las presas no logran almacenar suficiente agua, lo que obliga a una mayor dependencia de pozos (Servicio Meteorológico Nacional, 2024).

En Guanajuato Capital, los años secos se han vuelto más frecuentes debido al cambio climático, lo que ha aumentado la presión sobre los acuíferos. Esto no solo afecta la disponibilidad de agua, sino que también incrementa la HH, ya que la extracción de agua subterránea requiere más energía y recursos que el uso de agua superficial (Hoekstra & Mekonnen, 2012).

### **3.3 Ciclo hidrológico urbano**

El ciclo hidrológico urbano es una adaptación del ciclo natural del agua que incorpora las actividades humanas asociadas al abastecimiento, uso y gestión del recurso hídrico en zonas urbanas. En este ciclo intervienen procesos como la captación, el almacenamiento, la potabilización, la distribución, el consumo, la recolección de aguas residuales, el tratamiento y la disposición final (ya sea como retorno al ambiente o reúso) (UNESCO, 2021). Describe el movimiento y la distribución del agua dentro de los entornos urbanos, que difiere significativamente de los procesos hidrológicos naturales debido a intervenciones humanas como el desarrollo de infraestructuras, los cambios en el uso del suelo y los sistemas de gestión del agua.

En el caso de Guanajuato Capital, este ciclo se caracteriza por una alta dependencia de fuentes subterráneas y una infraestructura compleja para la conducción del agua a través de una topografía irregular. Cada una de las etapas del ciclo influye directamente en la HHAD, ya que determina cuánta agua extraída realmente se utiliza y cuánta se pierde (Hoekstra et al., 2011).

- Captación: El agua proviene principalmente de pozos profundos. Toda el agua extraída del medio natural se considera parte de la HHAD independientemente de su uso posterior.
- Tratamiento de agua: El agua es transportada a una planta de tratamiento de agua donde se purifica para hacerla potable. El grado de tratamiento depende de la calidad del agua cruda y del propósito de uso.
- Conducción y distribución: Una vez tratada, el agua es transportada a través de redes hidráulicas. Durante esta etapa se presentan pérdidas significativas debidas a fugas en la red, conexiones clandestinas, roturas de tuberías o fallas operativas. Estas pérdidas no llegan al consumidor final ni se contabilizan como retornos al ambiente, por lo que aumentan la HHAD (CONAGUA, 2009a).
- Consumo doméstico y no doméstico: Es el volumen que realmente llega al usuario y se emplea para diversos fines (domésticos, comerciales, industriales). Parte de este volumen puede retornar al ambiente en forma de aguas residuales. Sin embargo, no todo el volumen consumido es recolectado, y su destino depende de la cobertura y eficiencia del sistema de alcantarillado (Hoekstra et al., 2011).
- Recolección y tratamiento de aguas residuales: Una fracción del agua consumida es recolectada y enviada a plantas de tratamiento. No toda el agua se recoge, ni todo el volumen tratado se devuelve al ambiente en condiciones adecuadas. Por

ello, solo una parte se considera retorno efectivo, que puede descontarse del cálculo de HH.

- **Reúso o disposición final:** En algunos casos, el agua tratada puede ser reutilizada para riego de áreas verdes o procesos industriales. El reúso puede contribuir a reducir la presión sobre las fuentes primarias.

### 3.3.1 Eficiencia en la Gestión de la Distribución de Agua en Organismos Operadores

La eficiencia en la gestión de la distribución de agua es un factor crítico para la sostenibilidad hídrica en cualquier ciudad. Los organismos operadores se enfrentan al desafío de suministrar agua de manera efectiva a una población creciente, minimizando las pérdidas y optimizando el uso del recurso. Las pérdidas de agua en los sistemas de distribución representan un volumen significativo de agua azul extraída que no llega a su destino final, impactando directamente la HH del abastecimiento (Rosa et al., 2020).

Las pérdidas de agua en una red de distribución se definen como la diferencia entre el volumen de agua que ingresa al sistema y el volumen que es efectivamente suministrado o facturado. Estas pérdidas pueden clasificarse en dos categorías principales (Alegre et al., 2016; CONAGUA, 2016):

- **Pérdidas Físicas:** Son el volumen de agua que se escapa de la red de tuberías debido a fugas, roturas, desbordamientos de depósitos o errores en la infraestructura. Estas pérdidas representan un consumo de agua azul que se pierde antes de llegar al usuario y, por lo tanto, aumentan la HH directa del sistema de abastecimiento.
- **Pérdidas Comerciales:** Se refieren al agua que es consumida pero no facturada o registrada, debido a errores de medición, conexiones clandestinas o usos no autorizados. Aunque no son pérdidas físicas del recurso en la red, distorsionan el balance hídrico y la gestión económica del sistema.

La eficiencia operacional de un organismo operador se mide comúnmente a través del porcentaje de agua no contabilizada, también llamado índice de pérdidas en la red. Un alto porcentaje de pérdidas implica que se requiere extraer un mayor volumen de agua bruta para satisfacer la misma demanda neta de los consumidores, lo que directamente incrementa la HH azul por unidad de agua efectivamente utilizada (Hoekstra et al., 2011). A nivel global, las pérdidas pueden variar del 15% al 56%, siendo los valores más altos reportados en países en desarrollo (Liemberger & Wyatt, 2019).

Para cuantificar la eficiencia física de un sistema de distribución, se utiliza la fórmula de eficiencia física (CONAGUA, 2009b).

$$\eta_{\text{física}} = \frac{\text{Volconsumido}}{\text{Volsumministrado}} \times 100 \quad (1)$$

Donde ( $\eta_{\text{física}}$ ) es la relación de eficiencia física del volumen consumido ( $\text{Vol}_{\text{consumido}}$ ) que es la cantidad de agua que reciben los usuarios en sus tomas, estén o no registradas por el Organismo Operador y el volumen suministrado ( $\text{Vol}_{\text{sumministrado}}$ ) que es la cantidad de agua producida o extraída de las fuentes de abastecimiento.

### 3.4 Legislación y políticas públicas

El marco jurídico y normativo de México para el abastecimiento y la gestión del agua se fundamenta en el artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, el cual reconoce el derecho humano al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. Bajo este mandato, el Estado garantiza el uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, considerándolos un activo nacional estratégico para la seguridad y el desarrollo del país. En este marco se sustenta en la Ley de Aguas Nacionales y una serie de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) administradas principalmente por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Estas normas regulan la asignación del agua, su

calidad, la gestión de las aguas residuales y las prácticas sostenibles, equilibrando el derecho humano al agua con las demandas económicas y ecológicas.

### **3.4.1 Ley de Aguas Nacionales (LAN, 1992)**

La Ley de Aguas Nacionales, promulgada en 1992 y modificada en 2016, es la piedra angular de la legislación federal en materia de aguas. Sus disposiciones clave incluyen:

- Asignación de aguas: Regula el uso, extracción y distribución de las aguas nacionales a través de permisos y concesiones otorgados por la CONAGUA.

- Función de la Conagua: Establece a la Conagua como la autoridad federal responsable de la administración de los recursos hídricos, incluyendo la expedición de permisos, el monitoreo de la calidad del agua y la supervisión de los consejos de cuenca.

- Consejos de Cuenca: Promueve la gestión descentralizada mediante la creación de consejos que incluyan a las partes interesadas de los sectores agrícola, industrial y urbano para coordinar la planificación y asignación regional del agua.

- Sostenibilidad y participación pública: Obliga a un uso sostenible del agua para evitar la sobreexplotación y fomenta la participación pública en la gestión del agua, especialmente en los distritos de riego y los servicios urbanos.

- Calidad del agua: Establece normas para los vertidos de aguas residuales y promueve el tratamiento para proteger las masas de agua.

### **3.4.2 Normas Oficiales Mexicanas (NOM)**

Diversos marcos regulatorios establecen lineamientos técnicos específicos para el abastecimiento de agua, la calidad y la gestión de las aguas residuales, aplicables en virtud de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (Congreso de la Unión., 1992). Las NOMs clave incluyen (Tabla 2):

Tabla 2. Principales Normas Oficiales Mexicanas (NOM) sobre la gestión del agua

<b>Norma Oficial Mexicana (NOM)</b>	<b>Contenido principal</b>	<b>Propósito / Aplicación</b>
NOM-011- CONAGUA-2015	Metodología para calcular la disponibilidad anual de agua superficial y subterránea.	Evaluar la sustentabilidad del agua y orientar su asignación, especialmente en regiones sobreexplotadas como Guanajuato.
NOM-001- SEMARNAT-2021	Límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales a cuerpos de agua nacionales.	Proteger los ecosistemas acuáticos de la contaminación.
NOM-002- SEMARNAT-1996	Criterios para descargas de aguas residuales en sistemas de alcantarillado urbano o municipal.	Asegurar compatibilidad con la capacidad de tratamiento del sistema de alcantarillado.
NOM-003- SEMARNAT-1997	Regulación del reúso de aguas residuales tratadas, especificando niveles de tratamiento.	Permitir usos como el riego, minimizando riesgos sanitarios.
NOM-014- CONAGUA-2003	Requisitos para la recarga artificial de acuíferos.	Mitigar la sobreexplotación de acuíferos en zonas críticas como el Valle de México y Guanajuato.

NOM-184-SCFI-2021	Metodología para el cálculo de la HHAD.	Fomentar el uso eficiente del agua en sectores industrial, agrícola y urbano.
-------------------	---	---

### 3.4.3 Normativa estatal y municipal

Aunque las leyes federales proporcionan el marco general, los estados y municipios adaptan la normativa a las condiciones locales:

- Secretaría del Agua y Medio Ambiente (SAMA): Anteriormente conocida como la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG), este organismo evolucionó a nivel de Secretaría a partir de mayo de 2024, bajo la administración estatal actual. Este cambio busca fortalecer la gobernanza hídrica y centralizar la planeación estratégica. La SAMA coordina el apoyo técnico a los municipios, gestiona proyectos de infraestructura hidráulica y supervisa la calidad del recurso, manteniendo las atribuciones de la antigua CEAG, pero con una estructura institucional de mayor jerarquía política y operativa.
- Reglamentos municipales: Los municipios emiten reglamentos para el suministro de agua, el saneamiento y el cobro de tarifas. Por ejemplo, el Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guanajuato (SIMAPAG) opera bajo reglamentos locales alineados con las NOM.
- Descentralización: Desde la reforma constitucional de 1983, los municipios son los principales responsables del abastecimiento de agua y el saneamiento, con el apoyo de fondos federales y estatales (CONAGUA, 2009a).

## **4. Marco metodológico**

### **4.1 Alcance de la investigación**

El presente estudio se enfoca exclusivamente en el cálculo de la HHAD del sistema de abastecimiento urbano de la ciudad de Guanajuato, capital, durante el periodo comprendido entre los años 2019 y 2024. El análisis se limita a estimar el volumen de agua azul efectivamente consumida, considerando las extracciones de fuentes subterráneas y superficiales, las pérdidas por fugas y evapotranspiración, y los volúmenes de agua retornada. Como parte del enfoque temporal, se realiza una diferenciación entre meses húmedos y secos, con el objetivo de caracterizar la variabilidad estacional en la disponibilidad hídrica y su impacto en la presión sobre los recursos hídricos utilizados para el abastecimiento urbano. No se contempla en este estudio el análisis de la HH verde, ni gris, ni el uso del recurso en otros sectores productivos distintos al urbano.

### **4.2 Recolección de datos**

Para el cálculo de la HHAD del abastecimiento urbano en la ciudad de Guanajuato, se utilizaron datos de consumo doméstico proporcionados por el organismo operador local (SIMAPAG), correspondientes al periodo 2019–2024, desagregados por zonas de servicio. Asimismo, se integraron los volúmenes mensuales de extracción de agua subterránea (pozos de Puentecillas y Santa Teresa), así como datos de eficiencia física de los sectores de la ciudad, obtenidas a partir de informes técnicos del SIMAPAG. Para la estimación de la evapotranspiración asociada a cuerpos de agua superficiales, se emplearon registros de precipitación, temperatura y evaporación obtenidos de las estaciones climatológicas 11007, 110024, 11137 y 11141 del Servicio Meteorológico Nacional.

### 4.3 Descripción de la metodología

La metodología empleada en este estudio se basa en los lineamientos propuestos por la Water Footprint Network (WFN) para el cálculo de la HHAD, adaptados al contexto urbano. El procedimiento consistió en estimar, para cada mes del periodo 2019–2024, el volumen de agua azul efectivamente consumido por el sistema de abastecimiento de la ciudad de Guanajuato capital.

La HHAD se calculó con base en la siguiente expresión:

$$HHAD = V_{subt} + V_{sup} + V_{embalses} - V_{ret} \quad (2)$$

- $V_{subt}$ : Corresponde al volumen mensual extraído de los pozos de Puenteillas y Santa Teresa, según los registros del organismo operador ( $m^3/mes$ ).
- $V_{sup}$ : Representa el volumen mensual de agua captado de fuentes superficiales (presas) para consumo urbano ( $m^3/mes$ ).
- $V_{embalses}$ : Se refiere al volumen mensual de agua perdido por evaporación en los embalses ( $m^3/mes$ ).
- $V_{ret}$ : Es el volumen mensual de agua retornado a la fuente original. En este estudio, dado que el flujo no regresa a la cuenca de extracción, se considera como cero ( $m^3/mes$ ).

Los datos de consumo doméstico por zona fueron utilizados para caracterizar la distribución espacial del uso del agua en la ciudad. Adicionalmente, se clasificaron los meses como húmedos o secos con base en los registros históricos de precipitación, con el fin de analizar la influencia de la estacionalidad en la magnitud de la HHAD.

## **4.4 Zona de estudio**

### **4.4.1 Localización geográfica**

La capital del estado, Guanajuato Capital, está ubicada en el centro de la entidad sobre las coordenadas aproximadas 21°01'04" de latitud norte y 101°15'24" de longitud oeste, con una altitud media de 2,045 msnm. El municipio limita al norte con San Felipe, al este con Dolores Hidalgo y San Miguel de Allende, al sur con Salamanca e Irapuato, y al oeste con Silao y León. El estado de Guanajuato está situado en la región centro-norte de México, entre las coordenadas 19°55'08" y 21°52'09" de latitud norte, y 99°41'06" y 102°09'07" de longitud oeste. Limita al norte con San Luis Potosí y Zacatecas, al sur con Michoacán, al este con Querétaro y al oeste con Jalisco, abarcando una superficie aproximada de 30,608 km<sup>2</sup>, representando el 1.6 % del territorio nacional (INEGI, 2022). El estado de Guanajuato está parcialmente incluido en la región hidrológica Lerma-Chapala-Santiago (RH-12), que abarca la mayor parte del estado (25,590 km<sup>2</sup>) y "Pánuco" (RH-26) en la zona norte (4,872 km<sup>2</sup>). La Región Hidrológica Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico (RHA VIII LSP) destaca a nivel nacional por su importante actividad económica, lo que ha impactado en la situación actual de los recursos hídricos, tanto cuantitativa como cualitativamente, en aguas superficiales y subterráneas (Figura 3).

Los asentamientos urbanos desorganizados, la degradación de las cuencas, la sobreexplotación de los acuíferos, el aumento de la demanda y los efectos de sequías e inundaciones ponen en riesgo las actividades humanas, incluyendo la sustentabilidad de los recursos hídricos de la región (CONAGUA, 2021).

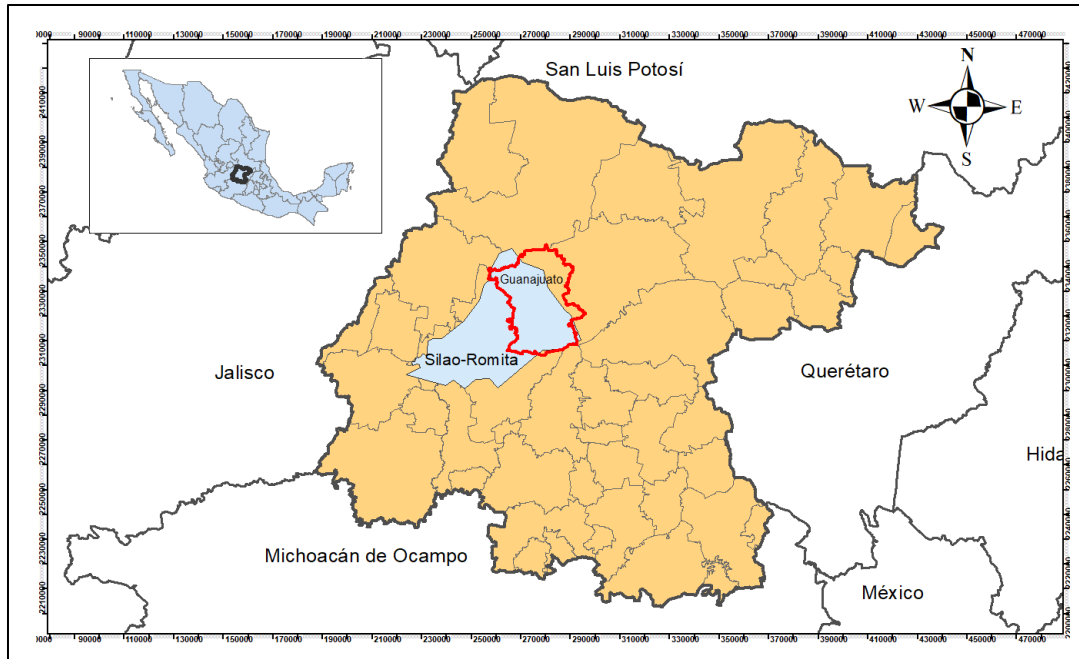


Figura 3. Mapa de ubicación del municipio de Guanajuato y el acuífero Silao-Romita. Fuente:

Elaboración propia

#### 4.4.2 Clima

Guanajuato Capital presenta un clima semiárido templado (BSk) según la clasificación de Köppen, con una temperatura media anual de 18°C y precipitaciones promedio de 650 mm anuales, concentradas en los meses de junio a septiembre (Pascual Ramírez et al., 2021). La evaporación potencial es alta (1,900 mm/año), lo que genera estrés hídrico en temporada seca (Comisión Nacional del Agua, 2019).

#### 4.4.3 Hidrología

La ciudad se localiza en la subcuenca del río Guanajuato (Figura 4), parte de la subcuenca Lerma-Salamanca (RH12Bd), que drena hacia el río Lerma y el Océano Pacífico (INEGI, 1980). El río Guanajuato, originado en la Sierra de Santa Rosa, recibe aportes de afluentes como los arroyos La Cata, Durán, San Antonio, Santa Ana, El Arco y El Pulque, confluyendo hacia la presa La Purísima.

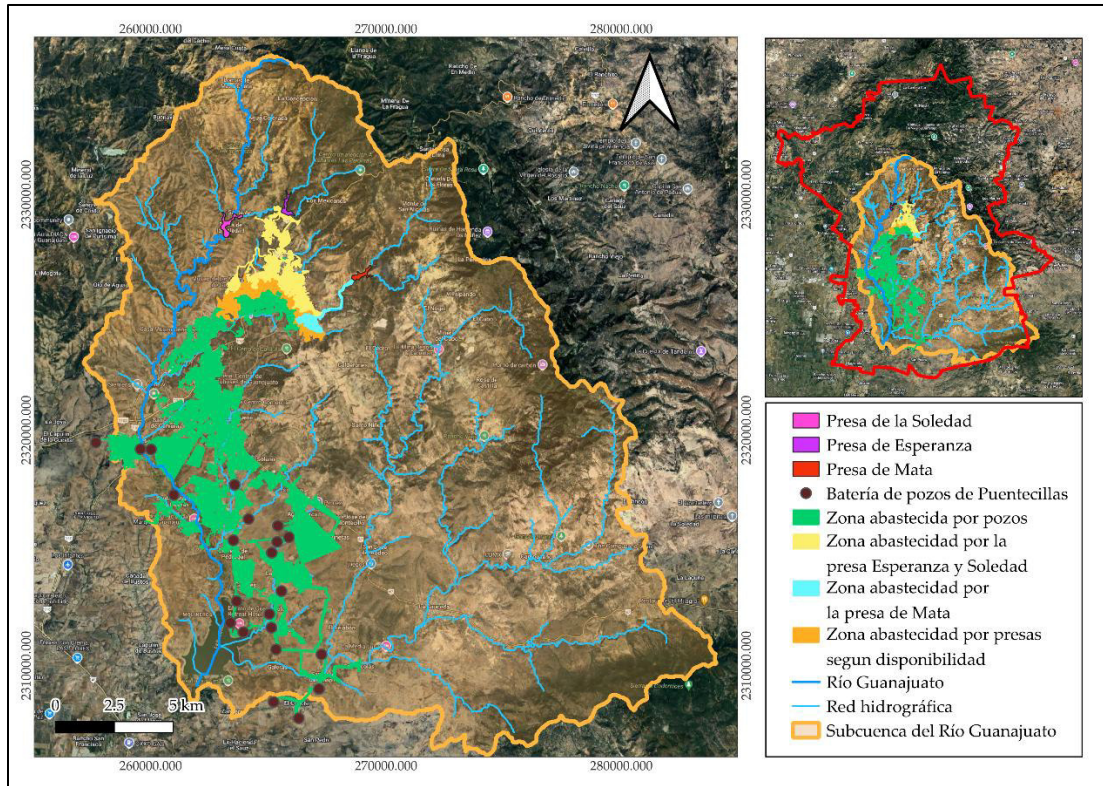


Figura 4. Ubicación de la subcuenca del río Guanajuato

El abastecimiento de agua potable proviene de fuentes superficiales y subterráneas. Las primeras comprenden las presas La Soledad, La Esperanza y Mata (Figura 4), mientras que las segundas corresponden a la batería de pozos de Puentecillas (Figura 5).

- Presa La Soledad: Construida en 1955 y tiene una capacidad al NAMO de  $4.6 \text{ hm}^3$  y un área de  $283,643.60 \text{ m}^2$ .
- Presa La Esperanza: Construida en 1955 y tiene una capacidad al NAMO de  $0.75 \text{ hm}^3$  y un área de  $167,910.81 \text{ m}^2$ .
- Presa Mata: Cuenta con una capacidad al NAMO de  $1.2 \text{ hm}^3$  y un área de  $178,069.52 \text{ m}^2$ .

Cada sector de la ciudad se abastece de un tipo específico de fuente, como se muestra en la Figura 6. La zona amarilla recibe agua de las presas de La Soledad y La

Esperanza, mientras que la zona azul se abastece de la presa de Mata. La zona verde es abastecida por pozos. Adicionalmente, la zona naranja se considera un sector transitorio, ya que su abastecimiento depende de la disponibilidad de agua en las presas, alternando entre las presas de La Soledad y La Esperanza o los pozos.

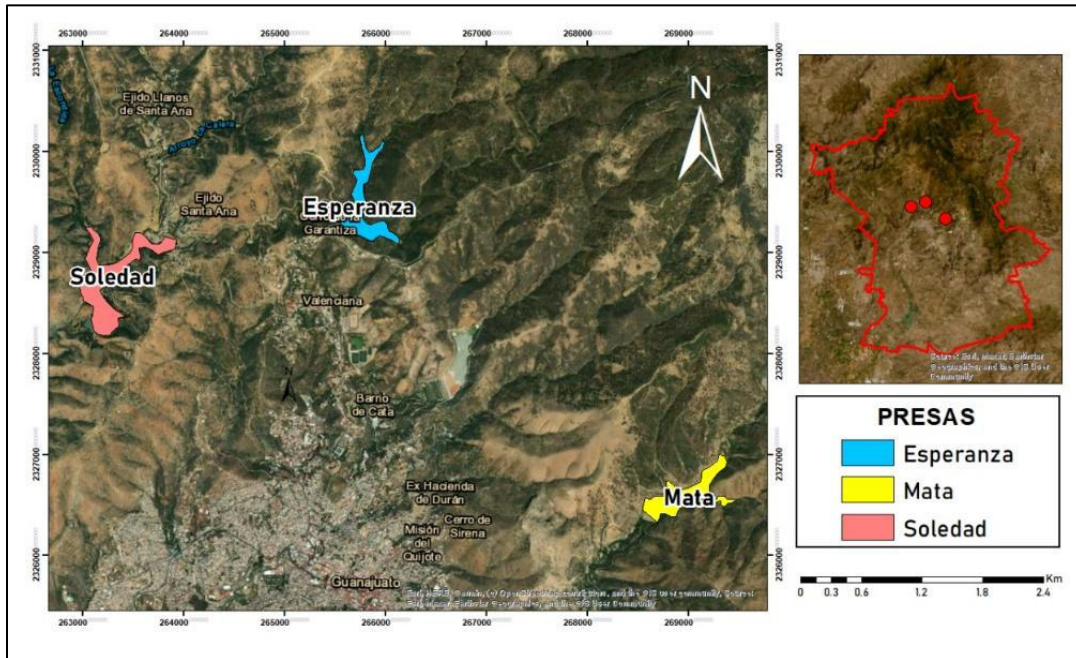


Figura 5. Ubicación de las presas que abastecen Guanajuato capital.



#### 4.5 Estimación de la evaporación mediante imágenes satelitales

El método del índice de diferencia normalizada del agua NDWI, por sus siglas en inglés: Normalized Difference Water Index), propuesto por McFeeters, (1996), es un índice para delimitar y supervisar los cambios en el contenido del agua superficial. Su cálculo se basa en las bandas del espectro Verde (Green) e Infrarrojo Cercano (NIR, por sus siglas en inglés: Near-Infrared), que en bandas del satélite serían las bandas tres y ocho respectivamente. Los valores de las masas de agua son superiores a 0.5. La vegetación tiene valores mucho más bajos, lo que facilita la distinción entre la vegetación y las masas de agua. Las zonas urbanizadas tienen valores positivos entre 0 y 0.2.

$$\frac{(Verde - NIR)}{(Verde + NIR)} \quad (3)$$

Con el fin de evitar la sobreestimación de la evaporación en los cuerpos de agua, se utilizaron imágenes satelitales de satélite Sentinel-2 MSI (MSI, por sus siglas en inglés: MultiSpectral Instrument), con una resolución espacial de 10 m para cada mes del periodo de estudio.

Se aplicó un filtrado de nubes mediante la banda SCL y posteriormente se aplicó el NDWI con un umbral de 0.1 para diferenciar los píxeles de agua del resto de la superficie. Con estos elementos se calculó el área total mensual (m<sup>2</sup>) del espejo de agua para cada cuerpo de agua.

La estimación mensual de evaporación de las tres presas que abastecen al municipio, calculada con la fórmula adaptada de Kohli & Frenken, (2015).

$$Ev = \frac{ET_0}{1000} \times A \quad (4)$$

Donde  $Ev$  es el volumen evaporado mensual (m<sup>3</sup>/mes),  $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia (mm/mes) y  $A$  es el área superficial de la presa (m<sup>2</sup>).

Para calcular la  $ET_o$  existen diversos métodos entre ellos, el Penman-Monteith es el más utilizado para estimar la evaporación, este requiere cinco parámetros climáticos: temperatura, humedad relativa, viento, presión de vapor de saturación y radiación neta. Sin embargo, puede utilizarse solo en lugares donde existe la suficiente información climatológica que demanda este método, mientras que el método propuesto por George H. Hargreaves & Zohrab A. Samani, (1985), es un modelo más sencillo que solo requiere dos parámetros climáticos: temperatura y radiación incidente.

$$ET_o = 0,0135 \times R_s \times (T_{med} + 17.8) \quad (5)$$

donde  $ET_o$  es la evapotranspiración potencial diaria (mm/día),  $T_{med}$  es la temperatura media y  $R_s$  es la radiación solar incidente (mm/día).

Para hallar  $R_s$  es con la siguiente ecuación.

$$R_s = R_o \times KT \times (T_{max} - T_{min}) \quad (6)$$

Donde  $R_o$  es la Radiación solar extraterrestre  $KT$  es un coeficiente  $T_{max}$  es la temperatura diaria máxima y  $T_{min}$  es la temperatura diaria mínima. Para obtener  $R_o$  se realiza en función de la latitud y del mes y  $KT$  tiene un valor de 0.162 para regiones del interior y 0.19 para regiones costeras. En el caso de las presas de Guanajuato capital, la fórmula final sería:

$$ET_o = 0.0023 \times (T_{med} + 17.78) \times R_o \times ((T_{max} - T_{min})^{0.5}) \quad (7)$$

## 5. Resultados

### 5.1 Patrones de consumo urbano (2019–2024)

Comprender el comportamiento del consumo de agua en una ciudad como Guanajuato capital, caracterizada por su topografía accidentada, su crecimiento urbano disperso y su dependencia histórica de fuentes subterráneas hacen que sea fundamental evaluar con mayor precisión su HHAD. En este apartado se presenta el análisis del consumo urbano mensual entre 2019 y 2024 (Tabla 3), distinguiendo los patrones entre meses húmedos y secos. Esta caracterización ofrece indicios sobre las presiones que ejerce la demanda urbana en los distintos escenarios de disponibilidad hídrica.

En este apartado se analiza el consumo urbano mensual de agua potable durante el periodo 2019–2024, a partir de los volúmenes facturados registrados por el organismo operador SIMAPAG (Tabla 3). El análisis permite identificar variaciones estacionales y distinguir patrones de consumo asociados a meses húmedos y secos, lo cual aporta información relevante sobre la respuesta de la demanda urbana ante distintos escenarios de disponibilidad hídrica.

Tabla 3. Consumo total mensual en m<sup>3</sup> en el periodo de estudio. Datos obtenidos de SIMAPAG

Mes/Año	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Enero	514,085	524,022	493,968	484,078	480,917	499,542
Febrero	521,464	486,823	489,481	476,356	533,810	493,046
Marzo	543,315	715,484	615,325	608,917	487,212	497,687
Abril	540,071	482,965	498,284	473,973	591,162	571,955
Mayo	610,941	465,596	493,537	498,518	488,917	542,304
Junio	502,651	486,413	477,892	578,973	556,775	449,970
Julio	502,883	485,163	483,288	512,383	574,675	489,557
Agosto	633,269	456,209	488,964	467,530	729,975	502,707
Septiembre	517,214	477,946	487,785	514,419	524,620	516,451
Octubre	545,034	550,369	513,035	498,118	546,035	542,944
Noviembre	524,183	447,472	590,991	536,236	466,316	518,901
Diciembre	529,718	541,658	590,794	501,613	460,907	518,076

<b>Total anual</b>	<b>6,484,828</b>	<b>6,120,120</b>	<b>6,223,344</b>	<b>6,151,114</b>	<b>6,441,321</b>	<b>6,143,140</b>
--------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------

El comportamiento temporal del consumo durante el periodo de estudio se muestra en la Figura 8. En términos generales, los valores más elevados de consumo se concentran principalmente en los meses de marzo y agosto, los cuales coinciden con periodos de mayores temperaturas y menor precipitación. Este patrón sugiere una influencia estacional asociada tanto a condiciones climáticas como a incrementos en el uso doméstico del agua durante los meses secos.

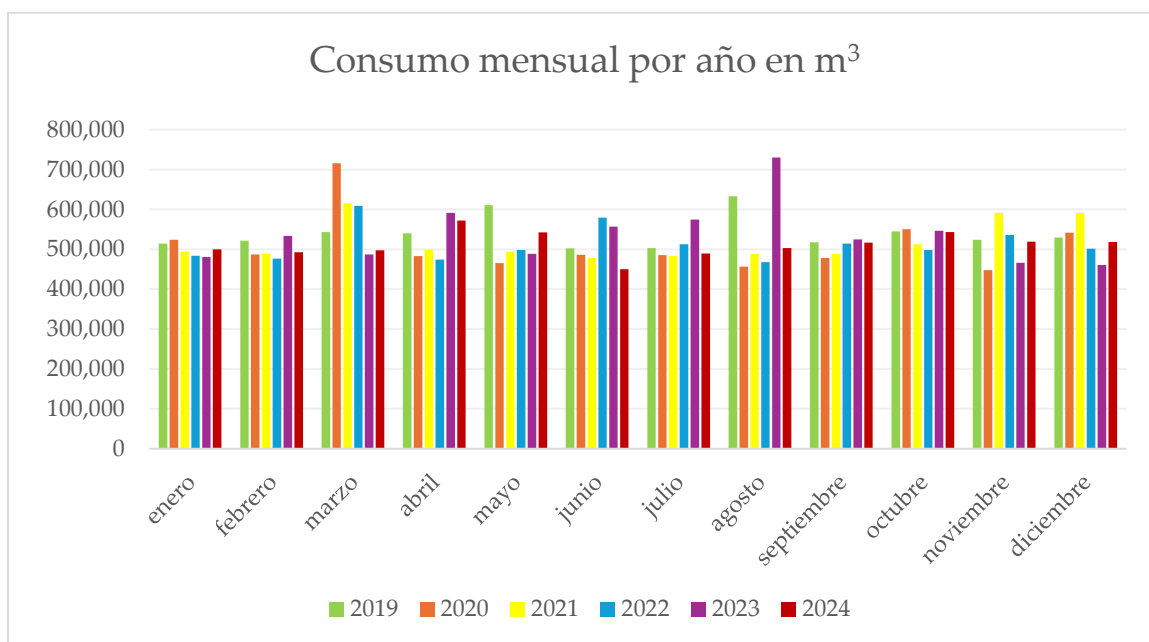


Figura 8. Distribución de consumo mensual en m³. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

El consumo normalizado que varía aproximadamente entre 136.3 y 79.1 l/hab/día, se determinó utilizando el volumen facturado promedio por toma registrado por SIMAPAG, dividido entre el factor de ocupación de 3.9 habitantes por vivienda reportado para el estado de Guanajuato por el Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2023). Para fines del cálculo presentado, este valor se redondeó a 4. Los resultados del consumo mensual normalizado se presentan en la Tabla 4. En general, los mayores consumos per

cápita coinciden con los meses secos, replicando el patrón identificado en los volúmenes totales. Al contrastar estos valores con los estándares internacionales de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que establece un rango de 50 a 100 l/hab/día para garantizar un nivel de servicio óptimo que cubra todas las necesidades de salud e higiene, los resultados de este estudio se sitúan de manera consistente dentro o ligeramente por encima de dicho umbral.

Esta alineación con los parámetros de la OMS indica que el sistema de abastecimiento en Guanajuato opera bajo un esquema de consumo responsable y eficiente, especialmente a partir de 2022, donde la mayoría de los registros mensuales se estabilizaron por debajo de los 100 l/hab/día.

Tabla 4. Consumo l/hab/día mensual en el periodo de estudio con datos obtenidos de SIMAPAG

Mes/Año	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Enero	100.73	99.82	92.22	81.90	81.37	86.11
Febrero	102.18	92.74	91.38	80.60	90.32	84.99
Marzo	106.46	136.30	114.88	103.03	82.43	85.79
Abril	105.83	92.00	93.03	80.19	100.02	98.59
Mayo	119.71	88.69	92.14	84.35	82.72	93.48
Junio	98.49	92.66	89.22	97.96	94.20	77.56
Julio	98.54	92.42	90.23	86.69	97.23	84.39
Agosto	124.09	86.90	91.29	79.10	123.51	86.65
Septiembre	101.35	91.05	91.07	87.04	88.76	89.02
Octubre	106.80	104.84	95.78	84.28	92.39	93.59
Noviembre	102.71	85.24	110.33	90.73	78.90	89.44
Diciembre	103.80	103.18	110.30	84.87	77.98	89.30

La Tabla 5 resume la evolución anual del consumo total, el número de tomas contratadas y el consumo promedio por habitante. A pesar de que el consumo total anual se mantiene relativamente estable entre 2019 y 2024, se observa una disminución progresiva del consumo per cápita, asociada principalmente al incremento en el número

de tomas y, por ende, de la población abastecida. Este comportamiento sugiere una reducción en el consumo unitario doméstico, lo que podría estar vinculado a cambios en los hábitos de uso, mejoras en la eficiencia del sistema o la implementación de medidas de gestión de la demanda.

Tabla 5. Número de tomas contratadas cada año. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

<b>Año</b>	<b>Consumo anual (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Tomas contratadas cada año</b>	<b>l/hab/día promedio</b>
2019	6.484.828	42,528	105.891
2020	6.120.120	43,746	97.154
2021	6.223.344	44,637	96.820
2022	6.151.114	49,253	86.728
2023	6.441.321	49,253	90.820
2024	6.143.140	48,345	88.242

#### 5.1.1.1 *Análisis de consumo por sectores*

El análisis sectorial permite identificar como es la distribución espacial del consumo en las diferentes zonas de la ciudad. La sectorización surge como una estrategia de gestión en la red de distribución, esto consiste en dividir la red en zonas independientes, delimitadas por válvulas. En cada sector se controla el caudal suministrado mediante dispositivos de medición y a su vez, la presión suministrada en dichos puntos (Gómez-Martínez et al., 2017). En el caso de Guanajuato capital, está dividido en 35 sectores (Figura 9), los cuales son: Carbonera, Biznagas, Filtros Borrego, Caminera, Cervera, Ex-Hacienda, Filtros L9, Filtros 8 San Antonio, Manantial, Marfil, Filtros Mellado, Venado 2 L6, Puentecillas, Santa Catarina, Santa Teresa, Teresas, Terrazas, Tres Estrellas, Yerbabuena, Chapin, Bombeo Presita, Bombeo Cienega, Bombeo Cajones, Bombeo Trinidad, Bombeo Pozo 7, Venado 2 Peñitas, Mata, Filtros 12, Filtros 8-

12-10-10, Venado 2 San Miguel, Venado L10-10, Filtros Venada, Filtros 8-12, Venado 2L10 Saucillo y Villas de Gto.

La demanda total de agua se concentra en un grupo reducido de sectores (Figura 10). Los cinco principales sectores representan más del 41 % del consumo acumulado en el periodo; Mata destaca como el sector de mayor demanda, con un consumo del 13 % del volumen total. Filtros 8-12-10-10 es el segundo sector más importante, con un consumo del 10.2 %.

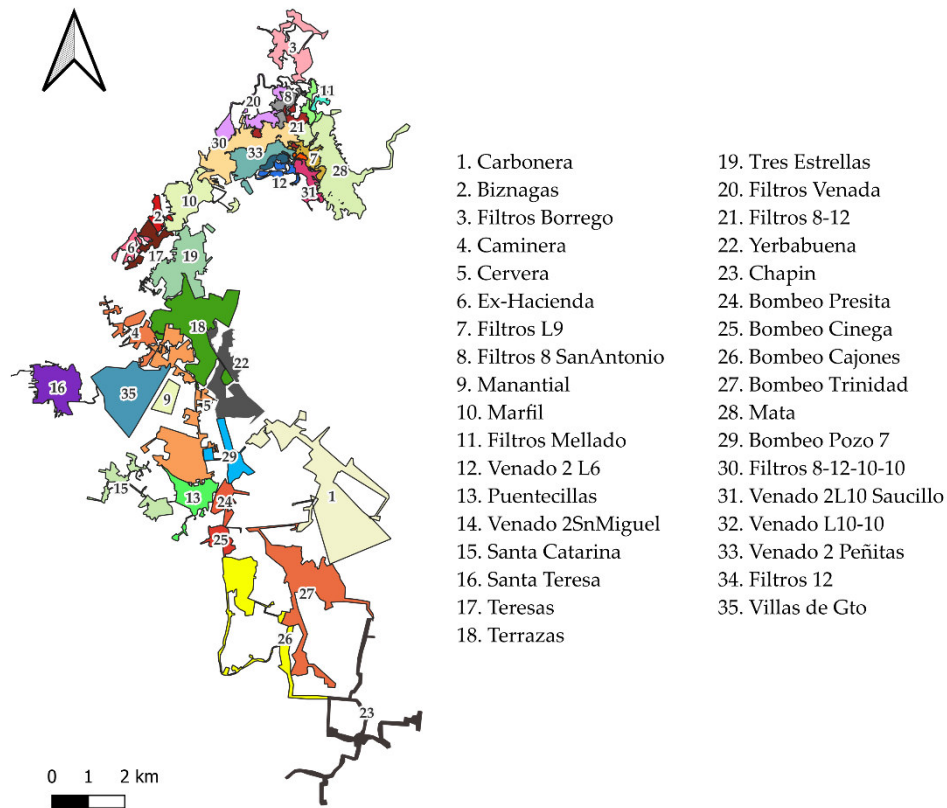


Figura 9. Nombre y ubicación de los 35 sectores hidráulicos de Guanajuato capital. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

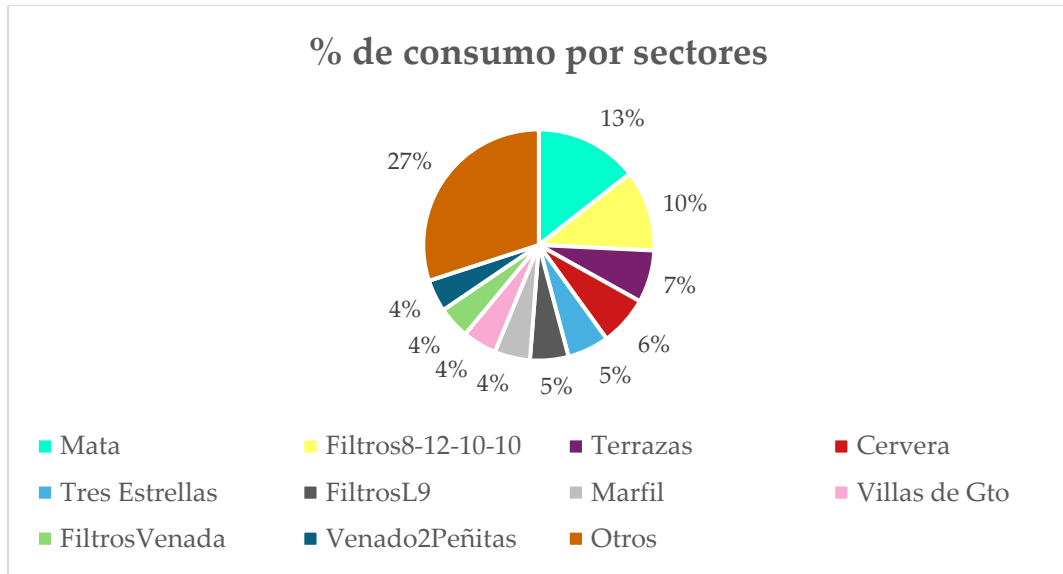


Figura 10. Distribución porcentual del consumo sectorial. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

La distribución del consumo sectorial a lo largo del periodo de estudio fue estable, como se puede observar en la figura 11, concentrándose los mayores consumos en el centro de la ciudad (colores rojos) y los sectores de las zonas del sur presentan consumos más bajos. La demanda elevada se asocia a áreas con mayor densidad de tomas, actividad comercial y de servicios. Los sectores de mayor demanda se repiten todos los años, mostrando un patrón de consumo muy estable.

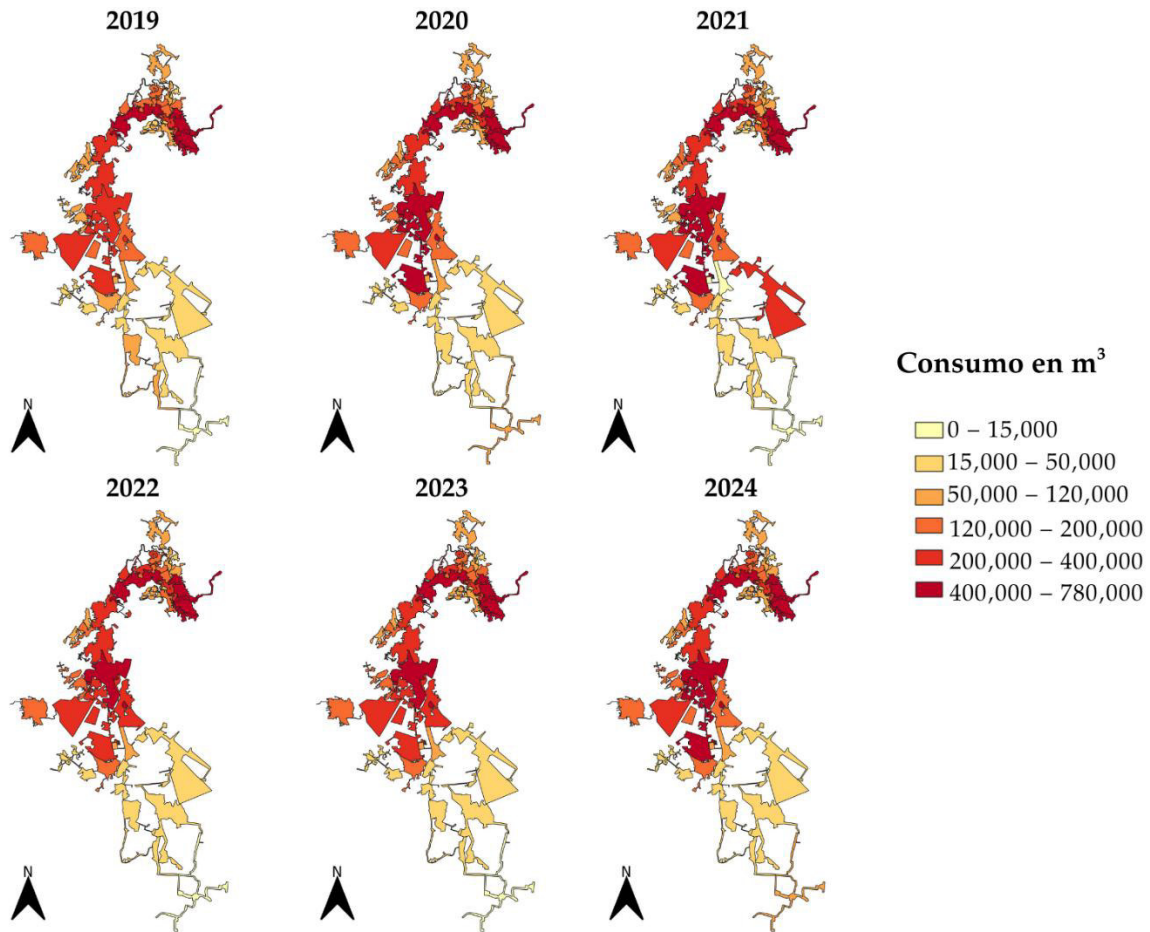


Figura 11. Consumo total por sector (m<sup>3</sup>/año) en Guanajuato capital del 2019-2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

El consumo normalizado por toma (l/toma/año) permite identificar patrones de uso que no dependen del número total de conexiones, sino del comportamiento del consumo a escala individual (Figura 12). En el periodo analizado, la mayoría de los sectores residenciales consolidados presentan valores relativamente estables, generalmente comprendidos entre 100,000 y 170,000 l/toma/año, lo que sugiere un uso doméstico regulado y consistente a lo largo del tiempo. Sin embargo, se identifican valores atípicos particularmente en el año 2019. Estos valores extremos coinciden con sectores que contaban con un número muy reducido de tomas en ese año, lo que indica que dichos consumos no representan consumos residenciales típicos. Al excluir el año

2019 del análisis, los consumos atípicos asociados a padrones con un número reducido de tomas disminuyen de manera significativa. Para el periodo 2020–2024, únicamente algunos sectores mantienen la combinación de pocas tomas y consumos elevados por unidad, como Bombeo Pozo 7 y Venado 2 L6, los cuales presentan consumos superiores a 300,000 l/toma/año de forma recurrente. En el resto de los sectores, el consumo normalizado se estabiliza dentro de rangos comparables al promedio del sistema.

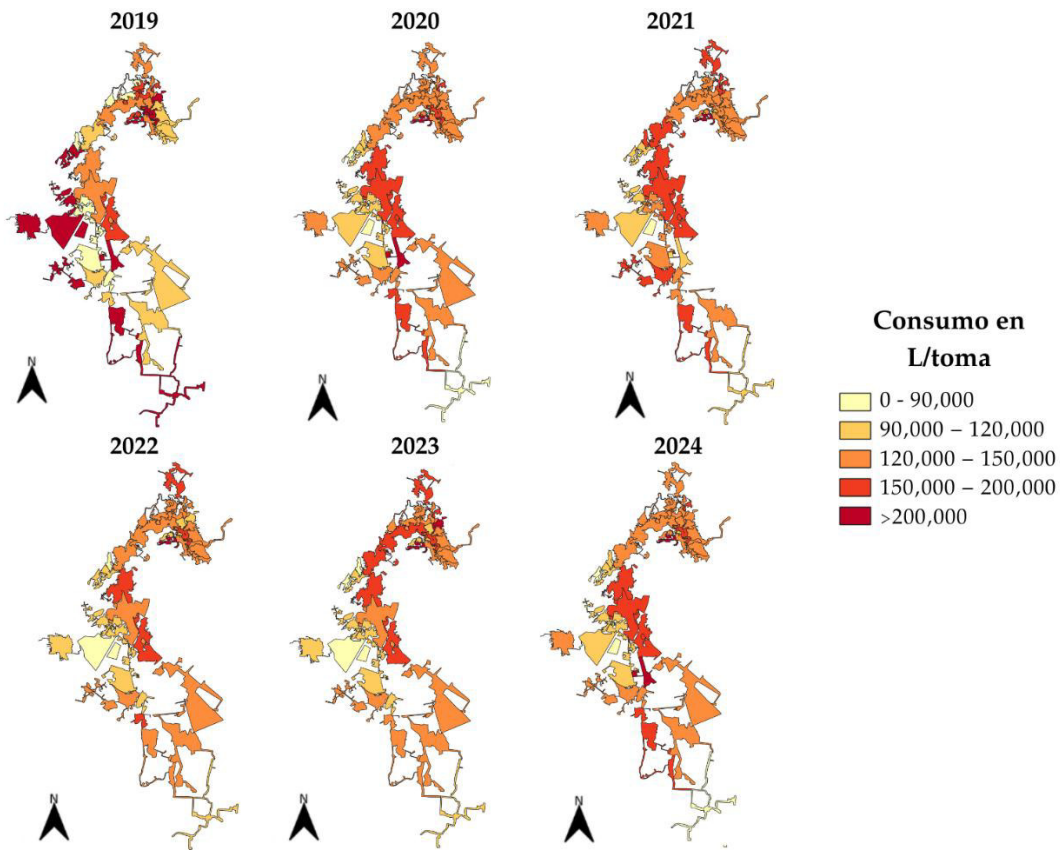


Figura 12. Consumo de L/toma en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

### 5.1.2 Análisis de consumo por tarifas

El sistema de abastecimiento urbano de Guanajuato capital opera con siete categorías tarifarias que agrupan a la población usuaria de acuerdo con su actividad:

Doméstica, Comercial y Servicios, Industrial, Espacios Públicos, Acueducto/Agua Comercial, Agua en bloque y Mixto.

Durante el periodo de estudio, la tarifa doméstica es la que tiene el mayor consumo, siendo entre en 72 y 76% del consumo total. La tarifa comercial y servicios es la segunda que tiene el mayor consumo con aproximadamente un 17 a 18% del consumo urbano. La tarifa mixta consume cerca del 4% del consumo del volumen anual. La tarifa industrial consume alrededor del 2%. La tarifa de espacios públicos se ubica en torno al 1% del consumo anual, reflejando volúmenes totales bajos frente al resto de usuarios, aunque, con consumos muy elevados por toma. La tarifa de Agua en bloque tiene un consumo muy bajo, menor al 1% y decreciente: en 2019 representaba alrededor de 1% del total, pero en 2023 y 2024 su consumo es nulo en los registros (Figura 13).

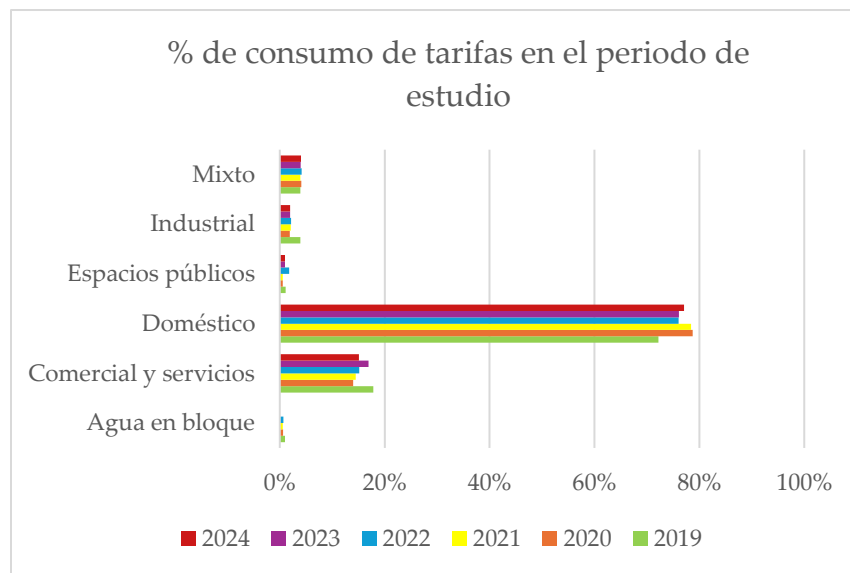


Figura 13. Participación porcentual de cada tarifa en el consumo anual total. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Las cifras reportadas de la tarifa doméstica en el 2019 y 2023 muestran que el volumen de agua consumido por toma se ha mantenido mayoritariamente en el rango de 270 a 350 L/toma/día, con fluctuaciones mensuales. Se observan ligeros incrementos

durante los meses de marzo-abril y octubre-noviembre, lo cual coincide con el aumento de las temperaturas o con mayor permanencia de las personas en sus hogares durante estos periodos. En 2021 y 2022 se identifica una tendencia hacia valores más moderados, aproximadamente entre 280 y 330 L/toma/día. En 2024 los consumos oscilan entre 267 y 356 L/toma/día. Si bien estos valores se mantienen dentro del rango histórico, destaca una menor variabilidad estacional. Este patrón sugiere que el consumo doméstico responde principalmente a hábitos rutinarios y no muestra alteraciones o incrementos sustanciales en el periodo más reciente (Figura 14).

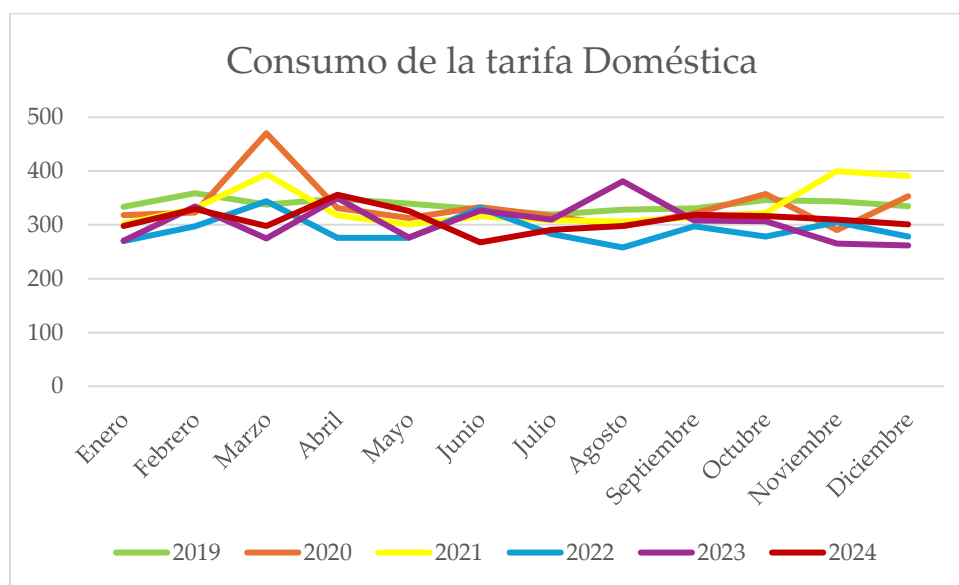


Figura 14. Consumo de la tarifa doméstica (L/toma/día) en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

La tarifa comercial y de servicios representa el sector más dinámico y variable en términos de consumo de agua dentro del sistema. Los resultados actualizados revelan que los años 2019 y 2023 continúan sobresaliendo como los de mayor demanda, alcanzando hasta 2,471 L/toma/día en agosto de 2019 y manteniendo valores superiores a 1,100 L/toma/día en varios meses, posiblemente los picos se deban a errores en la lectura, puesto que en el año 2019 hubo inconsistencias constantes. Durante el periodo 2020-2022 se observa una estabilización de los consumos, situándose generalmente en el

intervalo de 700 a 1,000 L/toma/día. Esto coincide con la dinámica económica y turística de la ciudad (Figura 15).

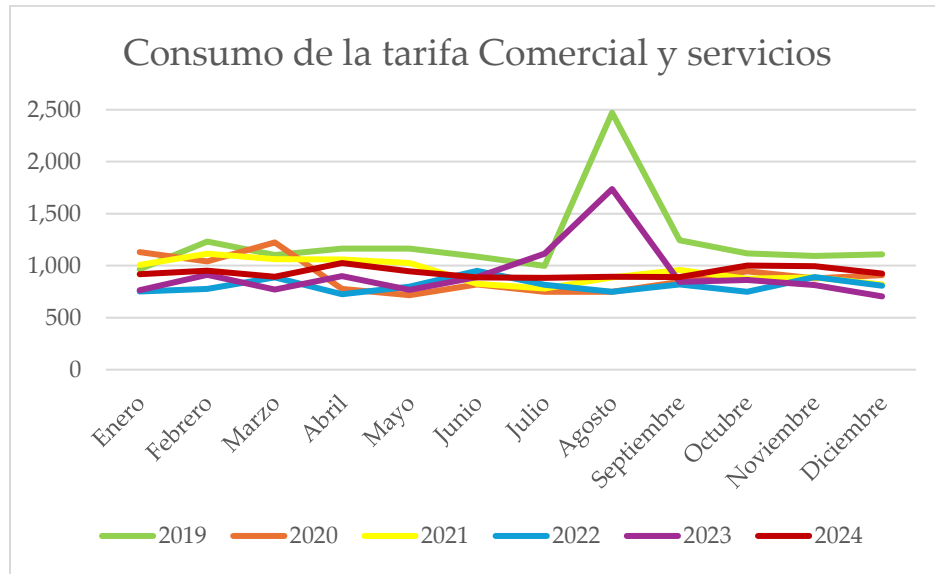


Figura 15. Consumo de la tarifa Comercial y servicios (L/toma/día) en el periodo de estudio.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Durante el periodo comprendido entre 2019 y 2023, la tarifa mixta mostraba una notable estabilidad en sus consumos, situándose generalmente entre 360 y 450 L/toma/día, con variaciones anuales moderadas. Sin embargo, los datos del 2024 revelan una disminución evidente, ubicándose ahora en el intervalo de 180 a 300 L/toma/día, lo que equivale a una reducción aproximada del 40 al 50% en comparación con los valores históricos registrados. Este descenso significativo no solo elimina los picos de consumo previos, sino que también reduce la variabilidad a lo largo del año, lo que se interpreta que el grupo de usuarios de la tarifa mixta ha experimentado cambios en sus patrones de uso y que en el 2024 hubo una disminución de usuarios (Figura 16).

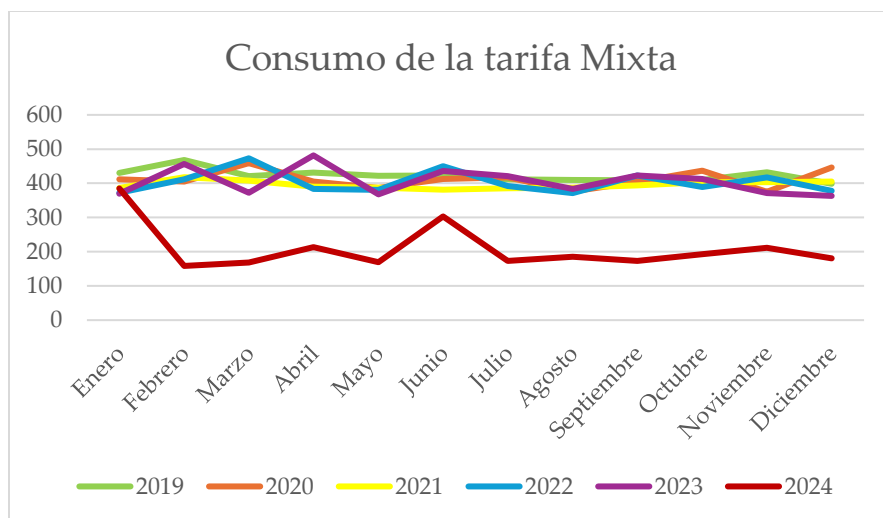


Figura 16. Consumo de la tarifa Mixta (L/toma/día) en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

### 5.2 Estimación de la evaporación en las presas

La evaporación anual combinada de las tres presas (Tabla 5, 6 y 7) varió entre 0.51 y 0.64 millones de m<sup>3</sup>/año, equivalente al 4–5 % del volumen total de agua utilizada para el abastecimiento urbano. Las presas Soledad y Mata registraron las tasas de evaporación más elevadas, debido a su mayor superficie expuesta y a su ubicación. En la figura 17 se puede observar comparación visual del índice NDWI en un mes seco (mayo) y un mes húmedo (julio) de 2024 donde se puede observar cómo varía la extensión del cuerpo de agua.

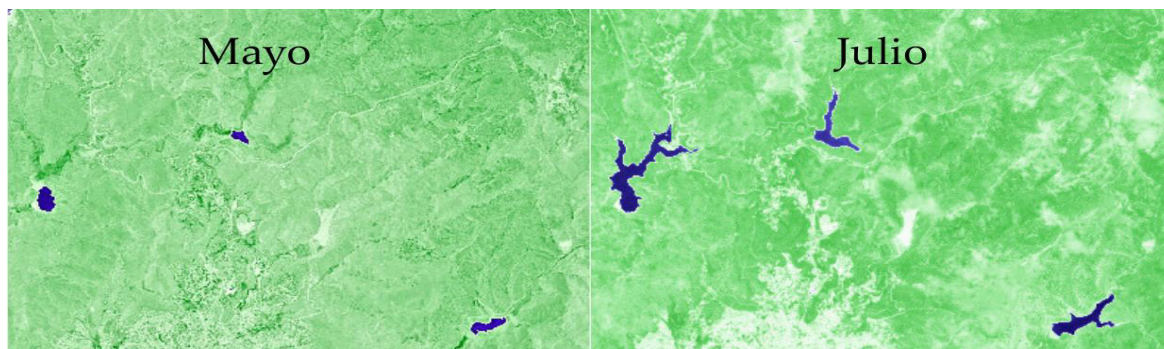


Figura 17. Comparación con el NDWI del área del espejo en las presas en un mes seco y húmedo respectivamente, del año 2024. Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Estimación de la evaporación mensual de la presa de Mata en m<sup>3</sup>. Elaboración: Fuente propia con los datos obtenidos del SMN

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Enero	13,420.27	14,698.09	13,323.79	17,842.95	11,080.44	8,039.01
Febrero	13,206.12	17,983.51	12,914.03	16,569.53	10,646.07	8,268.71
Marzo	19,510.65	22,297.08	15,807.04	20,570.27	13,137.64	10,008.67
Abril	19,954.64	20,327.30	14,264.90	21,060.08	12,447.80	9,447.86
Mayo	15,498.94	17,663.12	12,491.79	15,492.35	10,782.16	8,935.20
Junio	19,176.90	14,534.71	13,053.19	15,514.26	13,275.65	7,526.92
Julio	16,852.55	18,339.02	19,293.10	16,175.65	9,248.78	10,767.45
Agosto	24,207.01	20,977.01	19,266.95	16,879.82	7,674.81	16,766.68
Septiembre	20,705.71	17,050.00	19,418.66	15,441.05	9,623.24	18,968.16
Octubre	15,907.83	15,656.97	20,758.22	15,183.38	8,326.90	17,630.66
Noviembre	15,306.60	11,953.79	17,136.08	11,570.08	7,513.94	16,041.11
Diciembre	15,507.84	12,464.06	17,053.39	10,415.02	6,688.35	14,221.19

Tabla 7. Estimación de la evaporación mensual de la presa de la esperanza en m<sup>3</sup>. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SMN

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Enero	13,164.30	12,554.84	5,069.31	14,342.00	12,583.76	4,474.04
Febrero	14,145.84	15,516.90	5,314.11	15,056.95	12,826.13	4,284.15
Marzo	19,225.53	20,010.03	6,799.62	20,625.35	17,238.82	4,371.44
Abril	19,318.02	18,630.34	7,294.12	21,643.37	15,653.49	4,438.43
Mayo	15,915.23	18,347.42	6,444.19	20,081.96	14,331.88	4,282.83
Junio	15,008.24	13,852.13	10,440.87	14,151.80	10,830.52	3,549.15
Julio	11,848.50	9,442.18	17,597.86	14,501.75	8,317.40	8,189.58
Agosto	20,267.14	6,364.05	19,266.95	15,572.68	6,386.11	12,839.98
Septiembre	16,981.04	5,830.10	16,908.65	15,294.26	7,743.86	15,108.89
Octubre	8,086.92	6,569.74	16,808.74	15,721.33	5,506.30	15,961.70
Noviembre	12,546.27	5,298.26	14,640.46	12,885.57	5,201.77	14,772.01
Diciembre	12,659.00	4,826.36	13,817.55	11,154.48	3,867.47	13,044.52

Tabla 8. Estimación de la evaporación mensual de la presa de la soledad en m<sup>3</sup>. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del SMN

	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Enero	29,839.07	27,505.62	15,051.43	31,561.38	27,145.30	11,021.10
Febrero	29,658.39	31,251.18	12,034.21	31,121.73	23,000.85	10,281.66
Marzo	38,791.22	34,913.94	14,886.41	35,876.79	26,154.68	12,481.26
Abril	35,027.33	25,029.87	11,918.75	32,857.68	19,864.88	11,603.00
Mayo	21,012.00	22,471.62	11,427.47	27,827.03	16,961.07	11,962.05
Junio	18,807.19	20,531.88	26,483.93	20,013.25	21,589.77	5,568.34
Julio	29,354.64	23,758.84	45,237.13	25,653.21	22,096.34	16,671.04
Agosto	46,939.29	28,335.06	44,641.79	32,897.39	25,039.56	32,670.24
Septiembre	42,103.82	28,316.80	45,084.55	35,303.19	28,469.27	41,002.02
Octubre	32,257.92	24,894.25	44,232.09	38,027.37	17,100.36	40,083.46
Noviembre	33,522.67	18,195.60	36,642.05	31,124.14	13,447.16	33,962.37
Diciembre	29,888.44	15,164.08	33,910.03	27,016.37	9,275.84	28,440.50

### 5.3 Caracterización estacional (meses húmedos vs. secos)

Para el análisis de la HHAD del sistema de abastecimiento urbano de Guanajuato Capital, se realizó una clasificación de los meses en húmedos y secos con base en los registros de precipitación mensual de los años 2019 a 2024, obtenidos de estaciones meteorológicas en los portales del Servicio Meteorológico Nacional de CONAGUA.

Se consideraron meses húmedos aquellos cuya precipitación mensual superó el promedio de precipitación mensual total registrado durante el periodo de estudio. En este caso, los meses de julio y agosto, fueron clasificados como húmedos a lo largo del periodo de estudio, mayo, junio y septiembre también estuvieron consistentes mientras que el resto se consideraron meses secos (Tabla 8). Esta clasificación es coherente con el comportamiento climático regional, en el cual la mayor parte de la precipitación anual ocurre durante el verano, correspondiente al periodo de lluvias en el centro de México.

Esta distinción es relevante para los cálculos de la HHAD, ya que, en los meses secos, al no contar con aportaciones de precipitación significativas, el sistema de

abastecimiento depende en mayor proporción de la extracción de agua subterránea. Esto puede generar un incremento en la HH, ya que se requiere un mayor volumen de extracción para cubrir la misma demanda, particularmente si existen pérdidas en la red o si el nivel de los embalses disminuye debido a evaporación acumulada.

Tabla 9. Caracterización de la precipitación entre meses húmedos y secos (mm), siendo azul y rojo respectivamente. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del SMN

Mes/Año	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Enero	0	2.35	2.925	0.33	0.5	1.31
Febrero	0.45	30.925	0	1.37	0	15
Marzo	3.7525	16.65	0	0.33	4.95	6
Abril	0	40.35	4	11.27	3.3	0
Mayo	27.45	71.575	147.25	3.43	26.75	1.01
Junio	150.225	140.15	120.95	26.63	24.75	149.41
Julio	174.65	198.075	147.45	122.07	91	212.39
Agosto	146.4	127.525	214.75	247.03	197.95	81.27
Septiembre	123.125	88.225	250.73	67.53	25.65	154.9
Octubre	47	2.875	33.53	37.1	30.3	0.42
Noviembre	4.5	6.275	1.77	5.03	17.65	0.83
Diciembre	6.2	1.275	1.83	4.8	39.65	0.25
<b>Precipitación Acumulada</b>	<b>683.753</b>	<b>726.250</b>	<b>925.192</b>	<b>526.933</b>	<b>462.450</b>	<b>622.793</b>

#### 5.4 Cálculo de la HHAD

A continuación, se presenta un análisis detallado de la gestión hídrica correspondiente al periodo comprendido entre 2019 y 2024, estructurado a través de una serie de tablas anuales que permiten examinar la dinámica del recurso hídrico mes a mes.

Dentro de esta estructura, se destacan columnas fundamentales como la de Volumen total de extracciones, que refleja la captación bruta de los sistemas, y la de Consumos urbanos, que indica el volumen real utilizado tras considerar las pérdidas naturales por evaporación, las celdas resaltadas en azul señalan los meses húmedos del año en el año, mientras que aquellas en rosa indican los meses secos.

La HHAD se mantiene entre 810,000 y 1,005,000 m<sup>3</sup>/mes. Los meses de marzo y abril concentraron los valores más altos de 972,223 m<sup>3</sup>/mes y 1,005,306 m<sup>3</sup>/mes, respectivamente, mientras que los valores más bajos se registraron en enero (811,481 m<sup>3</sup>/mes), febrero (810,405 m<sup>3</sup>/mes) y julio (830,682 m<sup>3</sup>/mes). Estos meses son los que tienen con menor volumen total de extracciones y menores pérdidas por evaporación.

En el año 2019, la HHAD mensual en Guanajuato capital refleja la dinámica del uso de agua en relación con la estacionalidad climática. De acuerdo con la clasificación basada en precipitación, los meses de julio, agosto, septiembre y octubre se consideraron húmedos, mientras que el resto del año fue clasificado como seco. El total anual de HHAD fue de 10,532,163 m<sup>3</sup>/año y 247,652 L/toma/año (Tabla 9).

Tabla 10. HHAD para el 2019. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Mes	Volumen total extracciones (m <sup>3</sup> )	Evaporación (m <sup>3</sup> )	Tarifa Doméstica (m <sup>3</sup> )	Tarifa Comercial y de Servicios (m <sup>3</sup> )	Tarifa Industrial (m <sup>3</sup> )	Tarifa Mixta (m <sup>3</sup> )	Otras tarifas (m <sup>3</sup> )	HHAD (m <sup>3</sup> /mes)	HHAD (L/toma/mes)
Enero	755,057	56,424	392,996	77,065	11,792	22,218	10,014	811,481	19,081
Febrero	753,395	57,010	382,030	88,904	16,845	21,809	11,876	810,405	19,056
Marzo	894,695	77,527	398,440	88,107	17,198	21,702	17,868	972,223	22,861
Abril	931,006	74,300	397,824	89,999	15,476	21,507	15,265	1,005,306	23,639
Mayo	898,919	52,426	400,474	92,989	73,192	21,775	22,511	951,345	22,370
Junio	787,575	52,992	374,863	83,909	15,793	21,096	6,990	840,568	19,765
Julio	772,627	58,056	376,293	79,741	16,079	21,250	9,520	830,682	19,533
Agosto	790,753	91,413	386,749	197,241	20,064	21,117	8,098	882,166	20,743
Septiembre	783,805	79,791	376,858	96,162	17,968	20,404	5,822	863,596	20,307
Octubre	790,745	56,253	407,830	89,204	17,126	21,133	9,741	846,998	19,916
Noviembre	790,903	61,376	392,207	84,526	16,213	21,554	9,683	852,279	20,040
Diciembre	807,059	58,055	394,871	88,517	16,670	20,557	9,103	865,115	20,342
<b>Total</b>	<b>9,756,540</b>	<b>775,623</b>	<b>4,681,435</b>	<b>1,156,364</b>	<b>254,416</b>	<b>256,122</b>	<b>136,491</b>	<b>10,532,163</b>	<b>247,652</b>

La Figura 18 presenta la variación mensual de los principales volúmenes del sistema de abastecimiento urbano durante 2019, incluyendo las extracciones subterráneas y de presas, el volumen total de extracciones, la evaporación y los consumos urbanos. Asimismo, se incorporan únicamente las tarifas doméstica y comercial-servicios por ser las de mayor participación en el consumo urbano total. En el eje secundario se muestra la HHAD, la cual presenta una variación moderada a lo largo del año, alcanzando sus

valores máximos en los meses de marzo y abril. Este comportamiento coincide con un incremento en los volúmenes de extracción y consumo urbano.

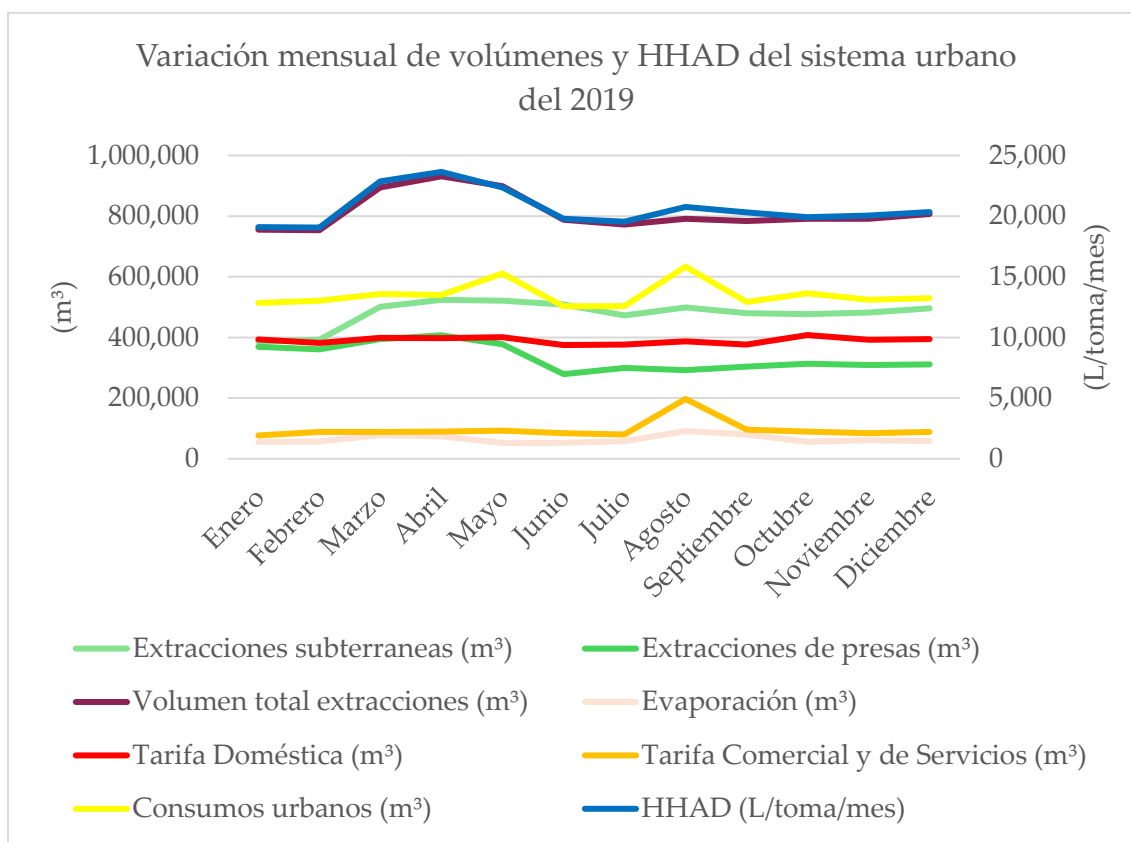


Figura 18. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2019. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

En el año 2020 osciló entre 808,144 y 989,455 m³/mes, en septiembre y marzo coincidiendo con la clasificación de meses húmedos y secos. Julio, agosto y septiembre fueron considerados meses húmedos, mientras que el resto del año se clasificó como seco. El total anual de HHAD alcanzó los 10,442,729 de m³/año y 238,713 L/toma/año (Tabla 10).

Tabla 11. HHAD para el 2020. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Mes	Volumen total extracciones (m³)	Evaporación (m³)	Tarifa Doméstica (m³)	Tarifa Comercial y de Servicios (m³)	Tarifa Industrial (m³)	Tarifa Mixta (m³)	Otras tarifas (m³)	HHAD (m³/mes)	HHAD (L/toma/mes)
Enero	858,580	54,759	386,618	91,321	15,811	22,218	9,129	913,338	20,878
Febrero	770,633	64,752	367,683	78,628	11,725	21,809	9,309	835,384	19,096
Marzo	912,233	77,221	572,076	98,867	11,575	21,702	9,396	989,455	22,618
Abril	914,483	63,988	390,041	60,755	5,282	21,507	6,761	978,471	22,367
Mayo	837,114	58,482	380,206	57,856	5,310	21,775	2,398	895,597	20,473
Junio	770,461	48,919	392,091	64,093	6,752	21,096	2,970	819,379	18,730
Julio	771,130	51,540	384,625	60,509	16,185	21,250	2,428	822,670	18,806
Agosto	785,005	55,676	362,287	60,539	7,075	21,117	6,987	840,681	19,217
Septiembre	756,947	51,197	377,784	65,916	8,124	20,404	6,011	808,144	18,474
Octubre	811,037	47,121	434,785	76,359	9,953	21,133	6,850	858,158	19,617
Noviembre	823,339	35,448	341,810	68,581	11,253	21,554	7,180	858,786	19,631
Diciembre	790,212	32,454	429,466	73,360	8,704	20,557	7,188	822,667	18,806
Total	9,801,173	641,556	4,819,472	856,784	117,749	256,122	76,607	10,442,729	238,713

Durante 2020, la HHAD presenta valores máximos en los meses de marzo y abril, coincidiendo con mayores volúmenes de extracción y consumo urbano. En los meses posteriores se observa una tendencia a la estabilización de la HHAD, asociada a una reducción gradual de los volúmenes consumidos (Figura 19).

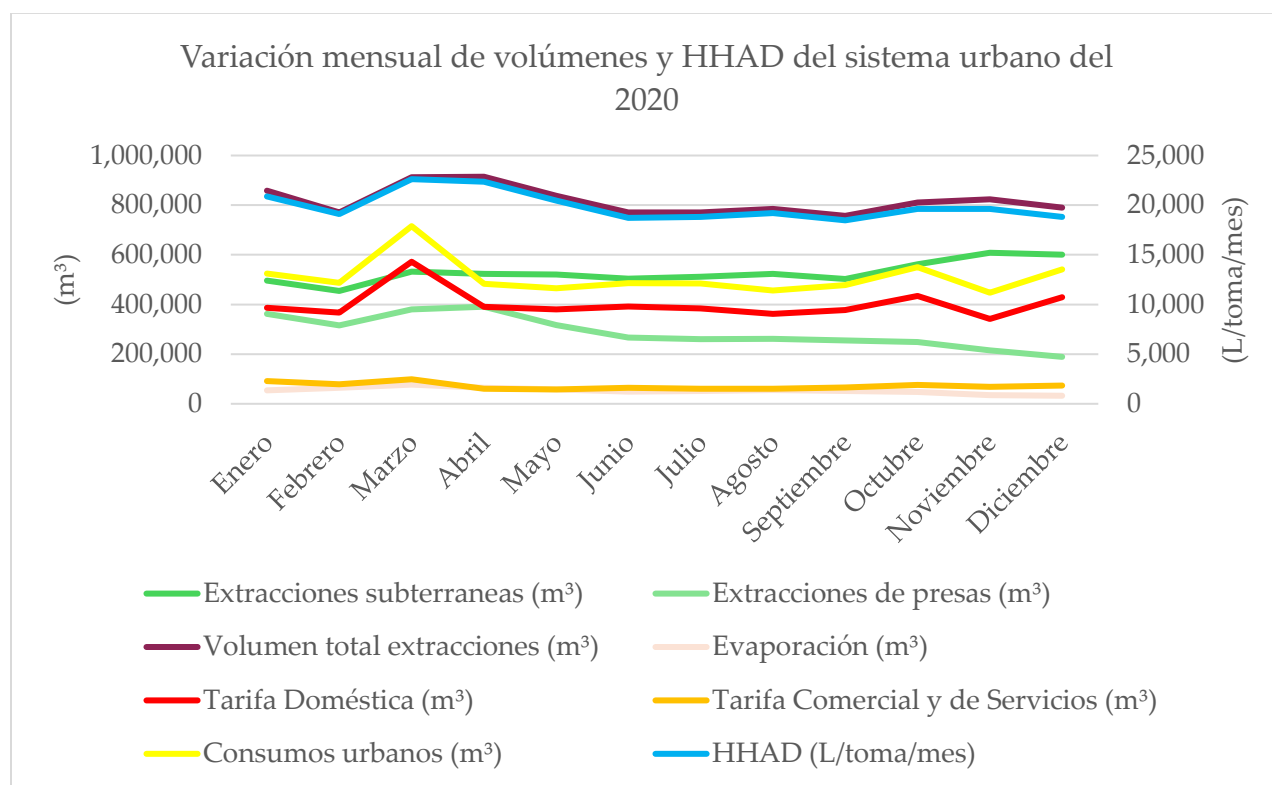


Figura 19. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2020. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

En 2021, la HHAD en Guanajuato capital fue de 9,782,740 m<sup>3</sup>/año y 219,162 L/toma/año, con valores mensuales que oscilaron entre 758,533 y 881,246 m<sup>3</sup>/mes. A diferencia de los años previos, los picos mensuales fueron menos pronunciados, registrándose el valor máximo en marzo (881,246 m<sup>3</sup>/mes). Según el análisis de precipitación, los meses de julio, agosto y septiembre fueron clasificados como húmedos, mientras que los demás se consideraron como meses secos (Tabla 11).

Tabla 12. HHAD para el 2021. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Mes	Volumen total extracciones (m <sup>3</sup> )	Evaporación (m <sup>3</sup> )	Tarifa Doméstica (m <sup>3</sup> )	Tarifa Comercial y de Servicios (m <sup>3</sup> )	Tarifa Industrial (m <sup>3</sup> )	Tarifa Mixta (m <sup>3</sup> )	Otras tarifas (m <sup>3</sup> )	HHAD (m <sup>3</sup> /mes)	HHAD (L/toma/mes)
Enero	746,103	33,445	375,501	81,941	10,220	20,119	6,187	779,547	17,464
Febrero	728,271	30,262	371,163	81,963	10,819	19,641	5,895	758,533	16,993
Marzo	843,753	37,493	489,770	86,453	9,908	21,249	7,945	881,246	19,743
Abril	783,053	33,478	382,171	83,541	10,228	19,646	2,698	816,530	18,293
Mayo	757,132	30,363	373,715	83,566	10,868	20,167	5,221	787,495	17,642
Junio	726,844	49,978	379,629	65,076	8,368	19,208	5,611	776,822	17,403
Julio	729,803	82,128	383,422	63,513	13,425	20,057	2,871	811,931	18,190
Agosto	730,623	83,176	380,910	72,252	10,305	20,140	5,357	813,799	18,231
Septiembre	726,235	81,412	377,404	75,338	11,147	19,859	4,037	807,647	18,094
Octubre	751,930	81,799	400,741	71,099	12,295	21,002	7,898	833,729	18,678
Noviembre	780,570	68,419	480,980	69,864	11,751	20,322	8,074	848,989	19,020
Diciembre	801,690	64,781	485,227	66,673	9,460	21,073	8,361	866,471	19,412
Total	9,106,007	676,733	4,880,633	901,279	128,794	242,483	70,155	9,782,740	219,162

La Figura 20 presenta la variación mensual de los principales volúmenes del sistema de abastecimiento urbano durante 2021, incluyendo las extracciones subterráneas y de presas, el volumen total de extracciones, la evaporación y los consumos urbanos. Asimismo, se incorporan únicamente las tarifas doméstica y comercial-servicios por ser las de mayor participación en el consumo urbano total. En el eje secundario se muestra la HHAD, la cual presenta valores relativamente menores en comparación con los años previos, con un incremento notable durante los meses de marzo y noviembre–diciembre. El valor máximo de HHAD se registra en marzo, asociado a un aumento en los consumos urbanos y en las extracciones totales.

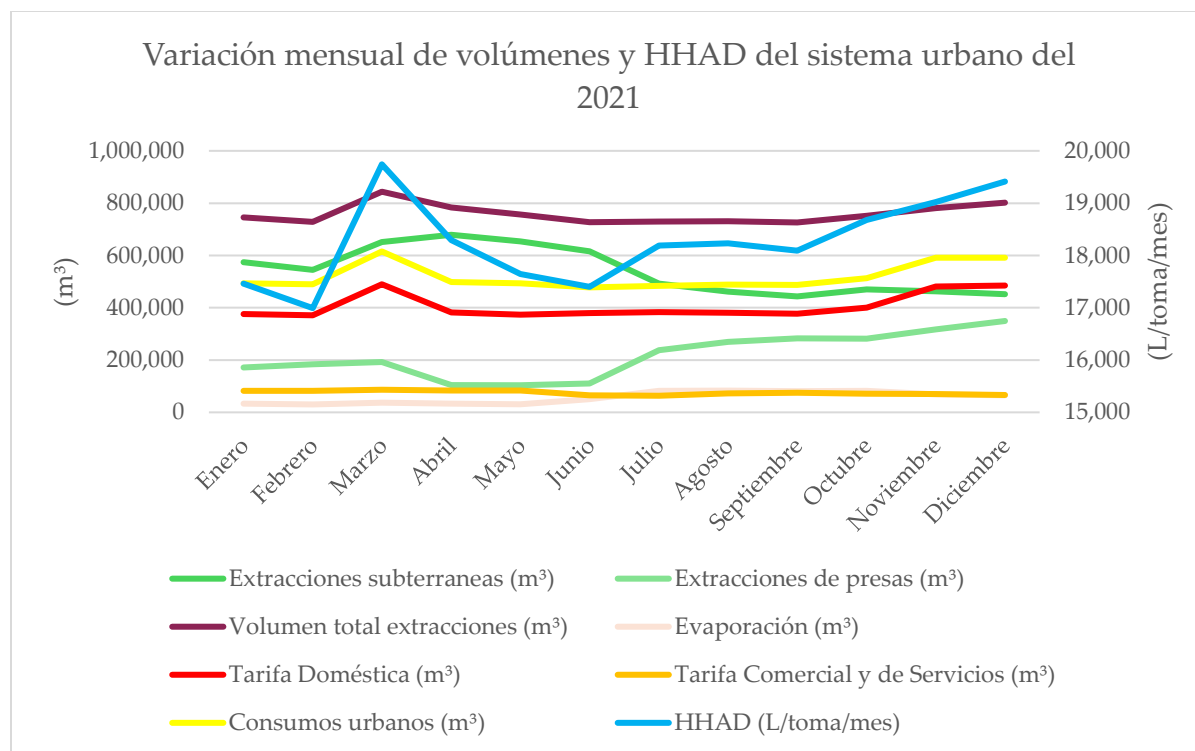


Figura 20. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2021. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.

En 2022, la HHAD mensual en Guanajuato capital mostró fluctuaciones, alcanzando su punto más alto en marzo con 1,028,251 m<sup>3</sup>/mes y el más bajo en febrero con 809,160 m<sup>3</sup>, indicando una intensificación de la presión en la temporada seca. LA HHAD total anual fue de 10,910,073 m<sup>3</sup>/mes y 221,511 L/toma/año (Tabla 12).

Tabla 13. HHAD para el 2022. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.

Mes	Volumen total extracciones (m <sup>3</sup> )	Evaporación (m <sup>3</sup> )	Tarifa Doméstica (m <sup>3</sup> )	Tarifa Comercial y de Servicios (m <sup>3</sup> )	Tarifa Industrial (m <sup>3</sup> )	Tarifa Mixta (m <sup>3</sup> )	Otras tarifas (m <sup>3</sup> )	HHAD (m <sup>3</sup> /mes)	HHAD (L/toma/mes)
Enero	840,799	63,746	368,363	73,372	11,057	20,153	11,133	904,545	18,365
Febrero	746,411	62,748	366,577	68,615	9,096	20,133	11,935	809,160	16,429
Marzo	951,179	77,072	469,419	86,611	11,676	25,606	15,605	1,028,251	20,877
Abril	916,266	75,561	364,276	68,639	9,067	20,077	11,914	991,827	20,137
Mayo	924,268	63,401	376,472	78,069	10,853	20,628	12,496	987,670	20,053
Junio	844,922	49,679	437,535	89,896	11,447	23,552	16,543	894,601	18,163
Julio	796,716	56,331	386,011	79,934	10,568	21,235	14,635	853,047	17,320
Agosto	792,833	65,350	352,079	73,096	11,343	20,101	10,911	858,183	17,424
Septiembre	802,831	66,038	392,574	77,642	11,233	22,172	10,798	868,869	17,641
Octubre	860,595	68,932	379,682	73,320	10,105	21,046	13,965	929,527	18,873
Noviembre	837,948	55,580	403,229	84,365	12,162	21,846	14,634	893,528	18,142
Diciembre	842,280	48,586	379,679	78,912	12,278	20,474	10,270	890,866	18,088
<b>Total</b>	<b>10,157,047</b>	<b>753,025</b>	<b>4,675,896</b>	<b>932,471</b>	<b>130,885</b>	<b>257,023</b>	<b>154,839</b>	<b>10,910,073</b>	<b>221,511</b>

En la Figura 21 se representa la evolución mensual de los principales volúmenes operativos correspondientes al año 2022. En el eje secundario se muestra la HHAD, la cual presenta un comportamiento estacional, con valores máximos registrados en los meses de marzo, abril y mayo, coincidentes con mayores volúmenes de extracción y consumo urbano. Durante el resto del año, la HHAD se mantiene relativamente estable.

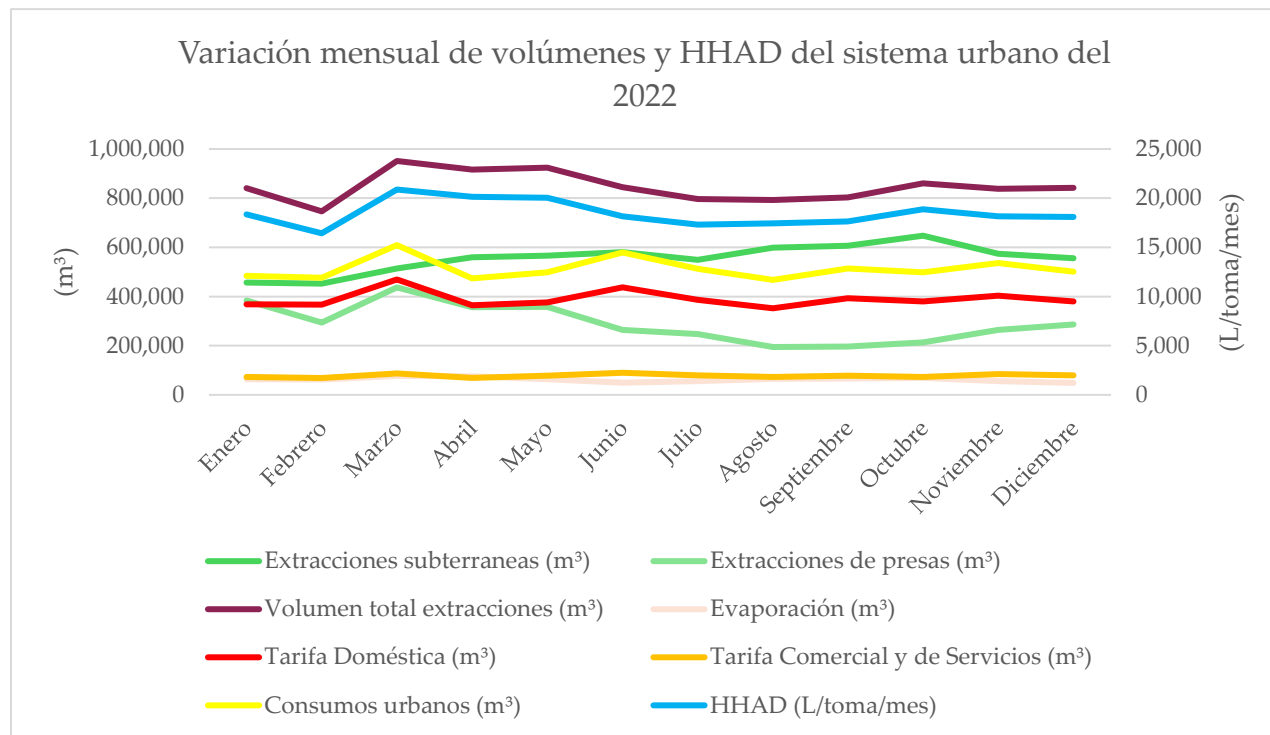


Figura 21. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2022. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.

Durante 2023 alcanzó un total de 11,157,861 m³/año y 226,542 L/toma/año, mostrando sus valores más altos en marzo y noviembre, siendo este último el más alto con un valor de 1,047,573 m³/mes, al analizar el año completo se observa que en 2023 la disponibilidad superficial no logró generar una disminución sustancial en las extracciones totales ni en la HHAD, lo que evidencia una presión sostenida sobre el sistema (Tabla 13).

Tabla 14. HHAD para el 2023. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.

Mes	Volumen extracciones (m³)	Evaporación (m³)	Tarifa Doméstica (m³)	Tarifa Comercial y de Servicios (m³)	Tarifa Industrial (m³)	Tarifa Mixta (m³)	Otras tarifas (m³)	HHAD (m³/mes)	HHAD (L/toma/mes)
Enero	845,848	50,809	369,067	76,380	11,066	19,998	4,406	896,657	18,205
Febrero	811,172	46,473	412,293	82,564	11,043	22,345	5,565	857,646	17,413
Marzo	900,559	56,531	375,169	77,217	8,664	20,153	6,009	957,091	19,432
Abril	871,773	47,966	461,797	87,012	11,009	25,239	6,105	919,739	18,674
Mayo	880,312	42,075	377,365	76,763	10,682	19,888	4,219	922,387	18,728
Junio	938,845	45,696	431,022	86,191	10,957	22,851	5,754	984,541	19,989
Julio	882,041	39,663	423,280	111,485	10,309	22,786	6,815	921,704	18,714
Agosto	843,210	39,100	520,093	173,819	10,717	20,750	4,596	882,311	17,914
Septiembre	851,234	45,836	406,664	81,761	11,235	22,162	2,798	897,071	18,214
Octubre	903,147	30,934	418,595	86,226	12,326	22,347	6,541	934,081	18,965
Noviembre	1,021,410	26,163	350,339	78,690	11,440	19,482	6,365	1,047,573	21,269
Diciembre	917,230	19,832	357,244	70,532	9,144	19,668	4,319	937,062	19,025
<b>Total</b>	<b>10,666,782</b>	<b>491,078</b>	<b>4,902,928</b>	<b>1,088,640</b>	<b>128,592</b>	<b>257,669</b>	<b>63,492</b>	<b>11,157,861</b>	<b>226,542</b>

La Figura 22 ilustra el comportamiento mensual de los principales volúmenes registrados durante 2023. En el eje secundario se presenta la HHAD, la cual muestra una variación moderada a lo largo del año, alcanzando sus valores máximos en los meses de junio y noviembre, mientras que durante el resto del año presenta un comportamiento relativamente estable, asociado a una demanda urbana constante.

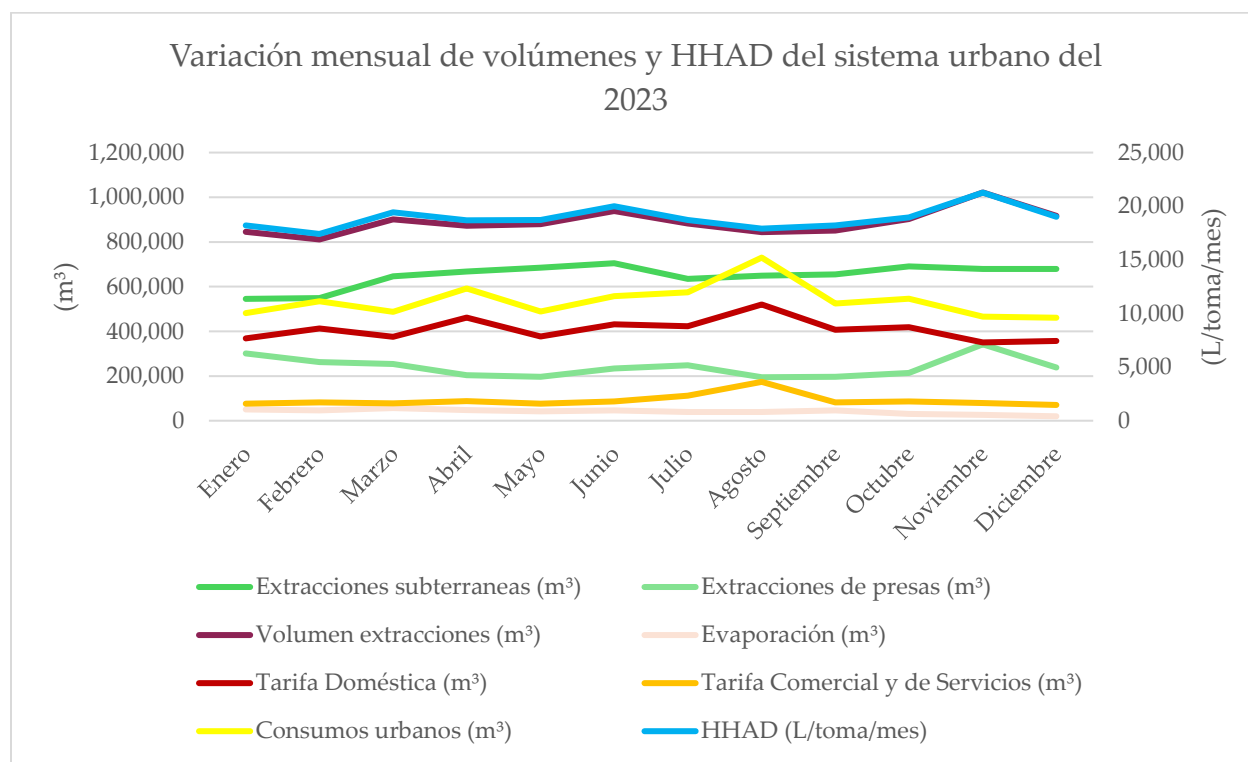


Figura 22. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2023. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.

En 2024 la HHAD registró un total anual de 10,511,691 m<sup>3</sup>/año y 217,431 L/toma/año, teniendo el valor más alto en noviembre (985,636 m<sup>3</sup>/año), el cual está caracterizado por una creciente dependencia del abastecimiento subterráneo. La HHAD normalizada mostró valores entre 16,034 y 20,408 L/toma/mes, siendo este año el que presenta, en promedio, la menor presión por toma del periodo analizado. (Tabla 14).

Tabla 15. HHAD para el 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG.

Mes	Volumen total extracciones (m <sup>3</sup> )	Evaporación (m <sup>3</sup> )	Tarifa Doméstica (m <sup>3</sup> )	Tarifa Comercial y de Servicios (m <sup>3</sup> )	Tarifa Industrial (m <sup>3</sup> )	Tarifa Mixta (m <sup>3</sup> )	Otras tarifas (m <sup>3</sup> )	HHAD (m <sup>3</sup> /mes)	HHAD (L/toma/mes)
Enero	788,403	23,534	387,775	77,308	8,984	20,596	4,879	811,938	16,795
Febrero	752,330	22,835	387,830	72,349	7,659	19,877	5,331	775,165	16,034
Marzo	850,315	26,861	388,386	75,310	9,022	20,271	4,698	877,177	18,144
Abril	829,310	25,489	446,745	83,520	11,056	23,140	7,494	854,799	17,681
Mayo	856,425	25,180	424,125	79,650	9,055	21,729	7,745	881,605	18,236
Junio	811,589	16,644	337,120	72,187	15,697	18,060	6,906	828,233	17,132
Julio	781,324	35,628	378,457	74,307	9,270	19,956	7,567	816,953	16,898
Agosto	828,955	62,277	387,725	75,264	9,894	20,570	9,254	891,231	18,435
Septiembre	785,249	75,079	401,985	72,521	8,975	21,439	11,531	860,328	17,796
Octubre	897,128	73,676	412,152	84,263	10,315	21,520	14,694	970,804	20,081
Noviembre	921,860	64,775	390,247	80,984	10,972	20,663	16,035	986,636	20,408
Diciembre	901,116	55,706	391,963	77,678	9,662	20,940	17,833	956,822	19,792
<b>Total</b>	<b>10,004,006</b>	<b>507,685</b>	<b>4,734,510</b>	<b>925,341</b>	<b>120,561</b>	<b>248,761</b>	<b>113,967</b>	<b>10,511,691</b>	<b>217,431</b>

En la figura 23 se observan los volúmenes registrados durante 2024 mensualmente. En el eje secundario se presenta la HHAD, la cual exhibe una variación moderada a lo largo del año, alcanzando sus valores máximos en los meses de octubre y noviembre. Estos incrementos coinciden con un aumento en los volúmenes totales de extracción y en los consumos urbanos hacia el último trimestre del año.

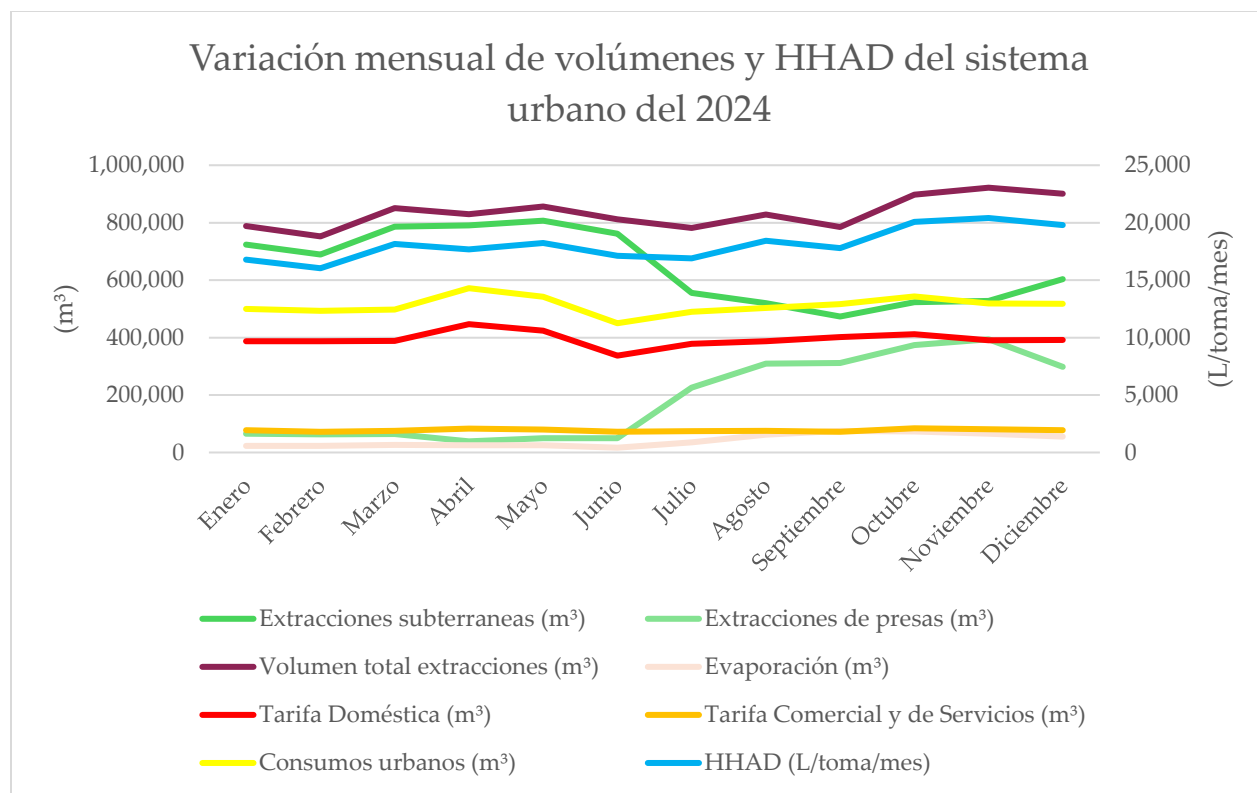


Figura 23. Variación mensual de los volúmenes de agua del sistema de abastecimiento urbano y su relación con la HHAD del año 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

En contraste, los valores mínimos de HHAD mensual no se concentraron en un único mes, sino que variaron entre años. En 2019, los menores valores se observaron en febrero con 810,405 m³/mes y julio con 830,682 m³/mes; en 2020, el mínimo se registró en septiembre con 808,144 m³/mes; en los años siguientes los mínimos se presentaron en el mes de febrero, en 2021 de 758,533 m³/mes; en 2022 de 809,160 m³/mes; en 2023 de 857,646 m³/mes; y en 2024 con 775,165 m³/mes. En general, los valores mínimos se ubicaron en un rango aproximado de 760,000 a 860,000 m³/mes, asociados a periodos con menor volumen total de extracciones y menores pérdidas por evaporación.

Asimismo, el descenso en la HHAD de 2021 se explica por una mejor disponibilidad superficial y una gestión más equilibrada entre fuentes, mientras que los repuntes de 2022 y 2023 reflejan un aumento del consumo y mayor evaporación en años

de pocas precipitaciones. Como se puede observar en la Figura 24, a menor precipitación, mayor HHAD.

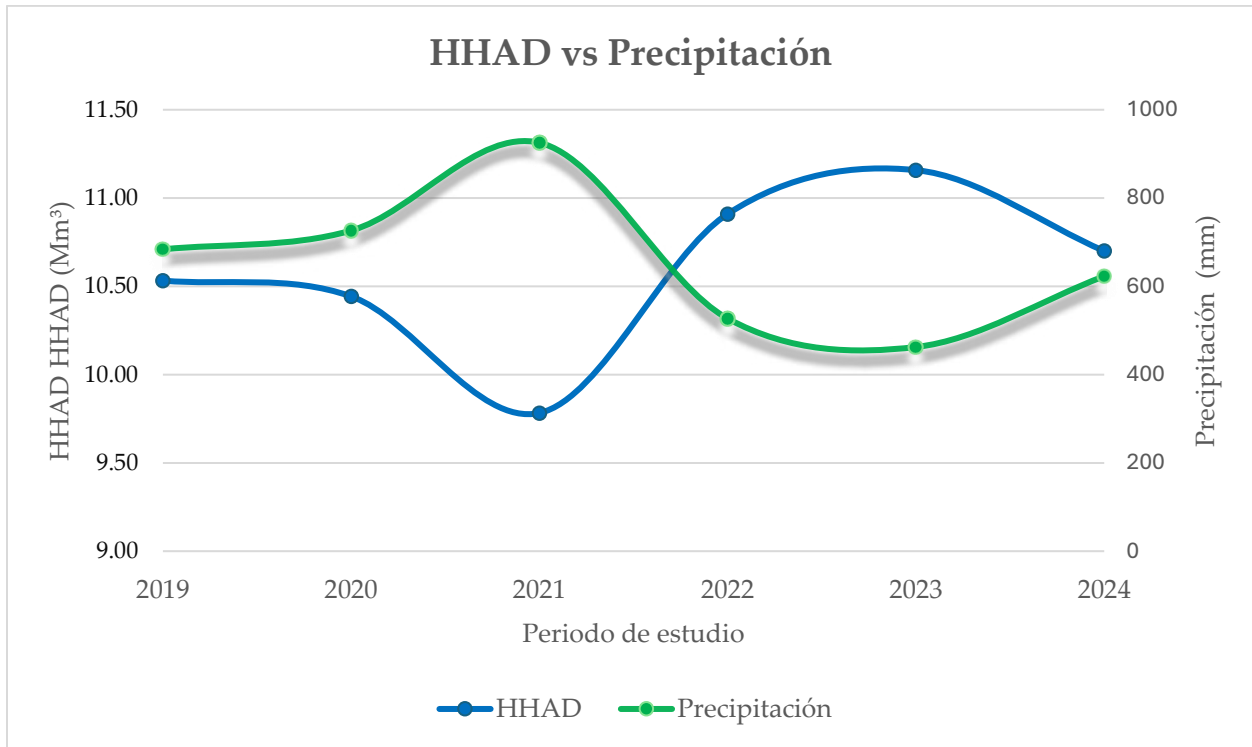


Figura 24. Relación de HHAD con la precipitación en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Al analizar la información a escala mensual, la relación entre la HHAD y la precipitación se vuelve más variable y menos evidente que en el análisis anual (Figura 25). Aunque en algunos meses con eventos de precipitación elevados se observan reducciones en la HHAD, esta relación no es constante a lo largo del periodo de estudio, lo que indica que el consumo urbano responde también a otros factores, como hábitos de uso, temperatura o demanda estacional. Esta gráfica permite apreciar la variabilidad intra anual y demuestra que la relación inversa entre ambas variables no siempre es inmediata ni lineal.

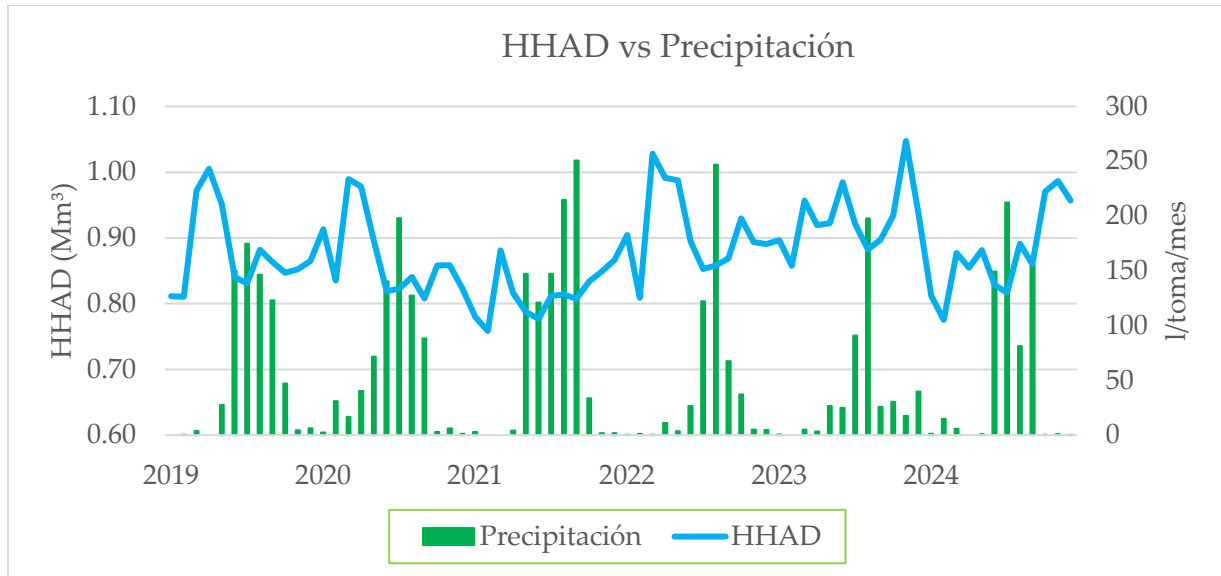


Figura 25. Relación de HHAD a nivel mensual con la precipitación en el periodo de estudio.  
 Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

La representación mensual de la HHAD expresada en  $L/toma/mes$  facilita una interpretación más directa del comportamiento del consumo a nivel de usuario (Figura 26). En esta gráfica se identifican fluctuaciones mensuales del consumo por toma que, en ciertos periodos, coinciden con aumentos o disminuciones de la precipitación, particularmente durante la temporada de lluvias. No obstante, la dispersión de los datos confirma que la precipitación no es el único factor que condiciona la HHAD, sino que su efecto se combina con otros elementos operativos y socioeconómicos, lo que justifica el análisis detallado a esta escala.

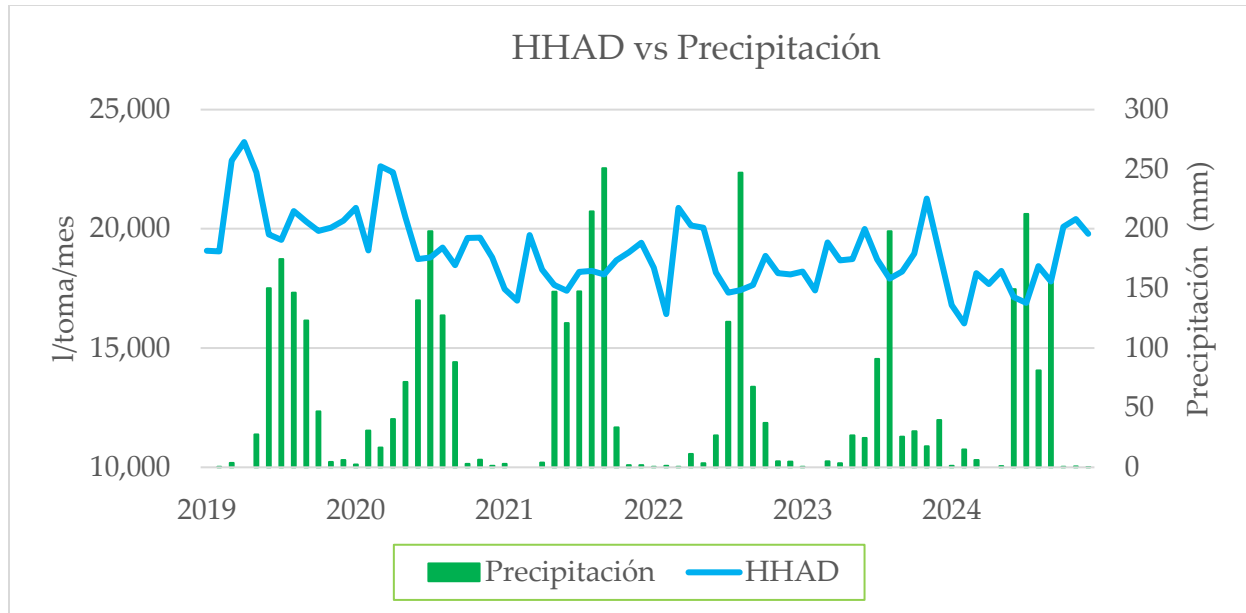


Figura 26. Relación de HHAD normalizada a nivel mensual con la precipitación en el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

### 5.5 Escenarios de gestión

La HHAD del abastecimiento urbano, está dada principalmente por los volúmenes de agua extraídos de fuentes superficiales y subterráneas, los cuales están fundamentados en la demanda urbana y en la eficiencia física de los sectores del sistema. Teniendo esto en cuenta, es posible reducir estos factores y de esta manera, reducir la HHAD y a su vez, el estrés hídrico en la región. Estudios como los de Akdeniz, (2022) y Ortega-Ballesteros et al., (2022) han mostrado que es posible reducir las pérdidas físicas del sistema mediante intervenciones en la infraestructura de la red y también con campañas de concientización han reducido los patrones de consumo doméstico (Morbidelli et al., 2025; Katz et al., 2016).

Los resultados obtenidos de la HHAD y de los patrones de consumo han permitido identificar sectores con altos consumos totales, altos consumos per cápita y eficiencias físicas por debajo de 55%, que son los sectores que más aportan a la HHAD. Teniendo esto en cuenta, se plantean escenarios que buscan estimar en que medida la

implementación de mejoras en eficiencia física y disminución del consumo doméstico podrían disminuir el volumen de extracciones requerido y así, reducir la HHAD del sistema de abastecimiento.

1. Mejora de eficiencia física: En este escenario se mantiene constante el consumo anual de cada sector ( $V_{consumo}$ ), y se simula una mejora de 10 puntos porcentuales en la eficiencia física ( $\eta$ ) (Tabla 15). Para cada sector se calculó el volumen de entrada inicial (antes de la mejora), volumen de entrada final (después de la mejora) y el ahorro en extracciones:

$$V_{\text{entrada, in}} = \frac{V_{\text{cons}}}{\eta_{\text{in}}} \quad (8)$$

$$V_{\text{entrada, in}} = \frac{V_{\text{cons}}}{\eta_{\text{in}}} \quad (9)$$

$$V_{\text{entrada, fn}} = \frac{V_{\text{cons}}}{\eta_{\text{fn}}} \quad (10)$$

$$\Delta V = V_{\text{entrada, in}} - V_{\text{entrada, fn}} \quad (11)$$

Tabla 16. Escenario 1 para reducir HHAD con valores del 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Sector	$\eta_{in}$	$\eta_{fn} (\eta + 10\%)$	Consumo 2024 (m <sup>3</sup> )	V entrada in (m <sup>3</sup> )	V entrada fn (m <sup>3</sup> )	Ahorro (m <sup>3</sup> /año)
Biznagas	0.85	0.90	96,122	113,085	106,802	6,282
Bombeo Cajones	0.66	0.76	34,839	52,786	45,841	6,946
Bombeo Cienega	0.66	0.76	21,108	31,982	27,774	4,208
Bombeo Pozo 7	0.66	0.76	80,845	122,492	106,375	16,117
Bombeo Presita	0.66	0.76	26,420	40,030	34,763	5,267
Bombeo Trinidad	0.66	0.76	44,936	68,085	59,126	8,959
Caminera	0.61	0.71	142,667	233,880	200,939	32,941
Carbonera	0.49	0.59	44,076	89,951	74,705	15,246
Cervera	0.49	0.59	400,017	816,361	677,995	138,366

Chapin	0.66	0.76	57,204	86,673	75,268	11,404
Ex-Hacienda	0.68	0.78	105,284	154,829	134,979	19,850
Filtros12	0.48	0.58	57,803	120,423	99,660	20,763
Filtros 8-12	0.79	0.89	135,248	171,200	151,964	19,236
Filtros 8-12-10-10	0.66	0.76	619,030	937,924	814,513	123,411
Filtros 8 San Antonio	0.52	0.62	128,982	248,042	208,035	40,007
Filtros Borrego	0.83	0.90	84,820	102,193	94,244	7,948
Filtros L9	0.66	0.76	304,744	461,733	400,979	60,754
Filtros Mellado	0.5	0.60	28,156	56,312	46,927	9,385
Filtros Venada	0.66	0.76	265,827	402,768	349,772	52,996
Manantial	0.85	0.90	197,531	232,389	219,479	12,911
Marfil	0.66	0.76	270,623	410,035	356,083	53,952
Mata	0.59	0.69	763,185	1,293,534	1,106,065	187,469
Puentecillas	0.9	0.9	122,547	136,163	136,163	0
Santa Catarina	0.49	0.59	44,190	90,184	74,898	15,285
Santa Teresa	0.62	0.72	154,018	248,416	213,914	34,502
Terasas	0.71	0.81	124,186	174,910	153,316	21,594
Terrazas	0.65	0.75	449,303	691,235	599,071	92,165
Tres Estrellas	0.55	0.65	350,006	636,375	538,471	97,904
Venado 2L10 Saucillo	0.66	0.76	118,611	179,714	156,067	23,647
Venado 2L6	0.66	0.76	53,990	81,803	71,039	10,764
Venado 2 Peñitas	0.66	0.76	250,069	378,892	329,038	49,854
Venado 2 Sn Miguel	0.66	0.76	52,968	80,255	69,695	10,560
Venado L10-10	0.66	0.76	24,397	36,965	32,101	4,864
Villas de Gto	0.79	0.89	292,601	370,381	328,765	41,616
Yerbabuena	0.51	0.61	196,787	385,857	322,602	63,255
						<b>1,320,427</b>

2. Disminución del consumo en sectores: En el escenario 2 se evalúa una reducción uniforme del 10% en el consumo anual de todos los sectores, manteniendo constante la eficiencia física de cada uno. El nuevo volumen de consumo se calcula con la ecuación 12. Dado que la eficiencia no se modifica, el volumen de entrada requerido disminuye y se calcula con la ecuación 13. La diferencia entre el volumen de entrada original y el volumen reducido representa el ahorro anual en extracciones. Este escenario simula una estrategia de gestión de la demanda basada en reducción del consumo, sin intervención en la infraestructura física del sistema (Tabla 16).

$$V_{\text{cons, fn}} = 0.9 V_{\text{cons, in}} \quad (12)$$

$$V_{\text{entrada, in}} = \frac{V_{\text{cons, in}}}{\eta} = \frac{0.9 V_{\text{cons, fn}}}{\eta} \quad (13)$$

Tabla 17. Escenario 2 para reducir HHAD con valores del 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Sector	$\eta$	Consumo 2024 (m <sup>3</sup> )	Reducción de consumo (10%)	V. entrada <i>in</i> (m <sup>3</sup> )	V. entrada <i>fn</i> (m <sup>3</sup> )	Ahorro en extracciones (m <sup>3</sup> /año)
Biznagas	0.85	96,122	86,510	113,085	101,776	11,308
Bombeo Cajones	0.66	34,839	31,355	52,786	47,508	5,279
Bombeo Cienega	0.66	21,108	18,997	31,982	28,784	3,198
Bombeo Pozo 7	0.66	80,845	72,761	122,492	110,243	12,249
Bombeo Presita	0.66	26,420	23,778	40,030	36,027	4,003
Bombeo Trinidad	0.66	44,936	40,442	68,085	61,276	6,808
Caminera	0.61	142,667	128,400	233,880	210,492	23,388
Carbonera	0.66	44,076	39,668	66,782	60,104	6,678
Cervera	0.49	400,017	360,015	816,361	734,725	81,636
Chapin	0.66	57,204	51,484	86,673	78,005	8,667
Ex-Hacienda	0.68	105,284	94,756	154,829	139,346	15,483
Filtros12	0.48	57,803	52,023	120,423	108,381	12,042
Filtros 8-12	0.79	135,248	121,723	171,200	154,080	17,120

Filtros 8-12-10-10	0.66	619,030	557,127	937,924	844,132	93,792
Filtros 8 San Antonio	0.52	128,982	116,084	248,042	223,238	24,804
Filtros Borrego	0.83	84,820	76,338	102,193	91,973	10,219
Filtros L9	0.66	304,744	274,270	461,733	415,560	46,173
Filtros Mellado	0.5	28,156	25,340	56,312	50,681	5,631
Filtros Venada	0.66	265,827	239,244	402,768	362,491	40,277
Manantial	0.85	197,531	177,778	232,389	209,150	23,239
Marfil	0.66	270,623	243,561	410,035	369,031	41,003
Mata	0.59	763,185	686,867	1,293,534	1,164,181	129,353
Puentecillas	0.98	122,547	110,292	125,048	112,543	12,505
Santa Catarina	0.49	44,190	39,771	90,184	81,165	9,018
Santa Teresa	0.62	154,018	138,616	248,416	223,575	24,842
Terasas	0.71	124,186	111,767	174,910	157,419	17,491
Terrazas	0.65	449,303	404,373	691,235	622,112	69,124
Tres Estrellas	0.55	350,006	315,005	636,375	572,737	63,637
Venado 2L10 Saucillo	0.66	118,611	106,750	179,714	161,742	17,971
Venado 2L6	0.66	53,990	48,591	81,803	73,623	8,180
Venado 2 Peñitas	0.66	250,069	225,062	378,892	341,003	37,889
Venado 2 SnMiguel	0.66	52,968	47,671	80,255	72,229	8,025
Venado L10-10	0.66	24,397	21,957	36,965	33,269	3,697
Villas de Gto	0.79	292,601	263,341	370,381	333,343	37,038
Yerbabuena	0.51	196,787	177,108	385,857	347,271	38,586
						<b>970,357</b>

3. Escenario mixto: En el escenario mixto se aplicó simultáneamente un incremento del 10 % en la eficiencia física del sistema y una reducción del 10 % en el volumen de consumo. A partir de estas modificaciones se recalcularon los volúmenes de entrada requeridos y el nuevo balance hídrico para cada sector (Tabla 17).

El ahorro reportado en este escenario corresponde a la reducción total del volumen de entrada al sistema (extracción), calculado como la diferencia entre el volumen de entrada inicial y el volumen de entrada final. Este valor refleja el efecto combinado de la disminución en la demanda y la mejora en la eficiencia.

Tabla 18. Escenario 3 para reducir HHAD con valores del 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Sector	$\eta_{in}$	$\eta_{fn}$	Consumo <i>in</i> 2024 (m <sup>3</sup> )	Consumo <i>fn</i> (m <sup>3</sup> )	V. entrada <i>in</i> (m <sup>3</sup> )	V. entrada <i>fn</i> (m <sup>3</sup> )	Reducción de extracciones (m <sup>3</sup> /año)
Biznagas	0.85	0.9	96,122	86,510	113,085	96,122	16,963
Bombeo Cajones	0.66	0.76	34,839	31,355	52,786	41,257	11,530
Bombeo Cienega	0.66	0.76	21,108	18,997	31,982	24,996	6,986
Bombeo Pozo 7	0.66	0.76	80,845	72,761	122,492	95,738	26,755
Bombeo Presita	0.66	0.76	26,420	23,778	40,030	31,287	8,743
Bombeo Trinidad	0.66	0.76	44,936	40,442	68,085	53,214	14,871
Caminera	0.61	0.71	142,667	128,400	233,880	180,845	53,035
Carbonera	0.66	0.76	44,076	39,668	66,782	52,195	14,587
Cervera	0.49	0.59	400,017	360,015	816,361	610,195	206,166
Chapin	0.66	0.76	57,204	51,484	86,673	67,742	18,931
Ex- Hacienda	0.68	0.78	105,284	94,756	154,829	121,482	33,348
Filtros12	0.48	0.58	57,803	52,023	120,423	89,694	30,729
Filtros 8-12	0.79	0.89	135,248	121,723	171,200	136,768	34,432
Filtros 8-12- 10-10	0.66	0.76	619,030	557,127	937,924	733,062	204,862

Filtros 8 San Antonio	0.52	0.62	128,982	116,084	248,042	187,232	60,810
Filtros Borrego	0.83	0.9	84,820	76,338	102,193	84,820	17,373
Filtros L9	0.66	0.76	304,744	274,270	461,733	360,881	100,852
Filtros Mellado	0.5	0.6	28,156	25,340	56,312	42,234	14,078
Filtros Venada	0.66	0.76	265,827	239,244	402,768	314,795	87,973
Manantial	0.85	0.9	197,531	177,778	232,389	197,531	34,858
Marfil	0.66	0.76	270,623	243,561	410,035	320,475	89,560
Mata	0.59	0.69	763,185	686,867	1,293,534	995,459	298,075
Puentecillas	0.9	0.9	122,547	110,292	136,163	122,547	13,616
Santa Catarina	0.49	0.59	44,190	39,771	90,184	67,408	22,775
Santa Teresa	0.62	0.72	154,018	138,616	248,416	192,523	55,894
Terasas	0.71	0.81	124,186	111,767	174,910	137,984	36,925
Terrazas	0.65	0.75	449,303	404,373	691,235	539,164	152,072
Tres Estrellas	0.55	0.65	350,006	315,005	636,375	484,624	151,751
Venado 2L10 Saucillo	0.66	0.76	118,611	106,750	179,714	140,460	39,253
Venado 2L6	0.66	0.76	53,990	48,591	81,803	63,936	17,868
Venado 2 Peñitas	0.66	0.76	250,069	225,062	378,892	296,134	82,758
Venado 2 SnMiguel	0.66	0.76	52,968	47,671	80,255	62,725	17,529
Venado L10-10	0.66	0.76	24,397	21,957	36,965	28,891	8,074
Villas de Gto	0.79	0.89	292,601	263,341	370,381	295,889	74,492
Yerbabuena	0.51	0.61	196,787	177,108	385,857	290,341	95,515
							<b>2,154,040</b>

La HHAD total para 2024 fue de 10,511,691 m<sup>3</sup>, resultado de la suma del volumen total extraído (10,004,006 m<sup>3</sup>) y la evaporación estimada (507,685 m<sup>3</sup>). En los escenarios

evaluados, la evaporación se mantuvo constante y la variación de la HHAD estuvo determinada exclusivamente por la reducción en los volúmenes de extracción.

La disminución porcentual de la HHAD se calculó tomando como referencia el escenario base, observándose reducciones de 9.75 %, 7.16 % y 15.90 % para los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente (tabla 18).

Tabla 19. Comparación de la HHAD total bajo los escenarios evaluados respecto al año 2024.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Escenario	Extracción total (m <sup>3</sup> )	HHAD total (m <sup>3</sup> )	Reducción de HHAD (m <sup>3</sup> )	Reducción de HHAD (%)
Base (2024)	10,004,006	10,511,691	—	—
Escenario 1	8,979,518	9,487,203	1,024,488	9.75 %
Escenario 2	9,251,129	9,758,814	752,877	7.16 %
Escenario 3	8,332,737	8,840,422	1,671,269	15.90 %

### 5.5.1 Estimación del ahorro monetario bajo escenarios de gestión para el año 2024

Se estimó el ahorro monetario anual (MXN/año) asociado a la reducción de extracción subterránea, derivada de los tres escenarios de gestión aplicados al sistema de abastecimiento urbano. El ahorro económico se cuantifica para el componente subterráneo debido a que la información financiera disponible corresponde a extracción subterránea (pozos, cárcamos y tanques). En la Tabla 19 se presentan los volúmenes de extracciones anuales por fuente de abastecimiento. Se observa que la extracción subterránea representa el 77.59% del volumen total

Tabla 20. Volúmenes anuales por fuente. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Extracciones subterráneas	7,761,872	(m <sup>3</sup> /año)
Extracciones de presas	2,242,134	(m <sup>3</sup> /año)
Volumen total extracciones	10,004,006	(m <sup>3</sup> /año)
Porcentaje correspondiente a pozos	77.588	(%)

Los costos operativos asociados a dicha extracción para el año 2024 se desglosan en la Tabla 20, mientras que en la Tabla 21 se calculan los costos unitarios por metro cúbico extraído.

Tabla 21. Costos anuales para la extracción subterránea del 2024. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Gasto anual en energía eléctrica (pozos, cárcamos y tanques)	\$ 42,702,550
Consumibles/materiales/servicios/nómina del departamento	\$ 12,223,942
Pago de derechos por extracción	\$ 765,716
Impuesto al valor agregado	\$ 8,910,753

Tabla 22. Costos por m<sup>3</sup> de la extracción subterránea. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Costo unitario energía eléctrica	5.50	mxn/m <sup>3</sup>
Costo unitario de consumibles, materiales, servicios y nómina del departamento	1.57	mxn/m <sup>3</sup>
Costo por m <sup>3</sup> de derechos por extracción	0.10	mxn/m <sup>3</sup>
Costo por m <sup>3</sup> de impuesto al valor agregado	1.15	mxn/m <sup>3</sup>

Utilizando estos costos unitarios, se procedió a calcular el ahorro económico derivado del volumen sin extraer en pozos. Primero, se determinó el volumen de agua subterránea ahorrado por cada escenario mediante la Ecuación 14.

$$V_{gw,esc} = V_{tot,esc} \cdot f_{gw} \quad (14)$$

Donde  $V_{gw,esc}$  es el valor del volumen ahorrado por escenario en aguas subterráneas,  $V_{tot,esc}$  es el ahorro volumétrico total del sistema en el escenario y es la  $f_{gw}$  el porcentaje de agua subterránea anual.

En la tabla 22 se observan los resultados del volumen que dejaría de extraerse de los pozos para cada escenario planteado.

Tabla 23. Ahorros volumétricos por escenario. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Escenario	Ahorro total del sistema (m <sup>3</sup> /año)	Volumen sin extraer en pozos (m <sup>3</sup> /año)
1) Incremento de 10 puntos porcentuales en la eficiencia física	1,320,427	1,024,488
2) Disminución del 10% en el consumo	970,357	752,877
3) Combinado	2,154,040	1,671,269

Finalmente, al aplicar los costos unitarios al sin extraer en pozos, se obtuvo el ahorro monetario total presentado en la Tabla 23. Como se observa, los escenarios de gestión reducen significativamente el gasto operativo. El Escenario 3 (Combinado) presenta el mayor beneficio económico, con un ahorro total estimado de 14,035,000 MXN/año. De este monto, más de 9.2 millones de pesos corresponden exclusivamente al ahorro en energía eléctrica por bombeo.

Tabla 24. Ahorro total por escenario de la extracción subterránea (MXN/año). Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Escenario	Energía	Consumibles	Derechos	IVA	Total
-----------	---------	-------------	----------	-----	-------

1) Incremento de 10 puntos porcentuales en la eficiencia física	5,636,304	1,613,436	101,067	1,176,129	8,526,935
2) Disminución del 10% en el consumo	4,142,013	1,185,684	74,272	864,315	6,266,284
3) Combinado	9,194,620	2,632,032	164,872	1,918,644	13,910,168

Los escenarios de gestión reducen el volumen requerido del sistema y, al disminuir la extracción subterránea, generan ahorros monetarios anuales.

La estimación del ahorro monetario se limita al componente de extracción subterránea debido a la disponibilidad de información financiera para pozos, cárcamos y tanques. La conversión del ahorro volumétrico total del sistema hacia volumen subterráneo evitado se realizó mediante la fracción subterránea anual observada en 2024 ( $f_{gw}$ ). Este supuesto permite evaluar comparativamente los escenarios de gestión en ausencia de costos desagregados equivalentes para fuentes superficiales.

Con el objetivo de vincular el análisis hidráulico con el análisis económico, se estimó la variación mensual de la HHAD bajo cada escenario de gestión a partir de los ahorros anuales de extracción previamente modelados. Para ello, se calculó el factor de reducción anual dividiendo el ahorro total del sistema entre el volumen anual de extracciones registrado en 2024 (10,004,006 m<sup>3</sup>). Así, el escenario de incremento de 10 puntos porcentuales en la eficiencia física generó un ahorro anual de 1,320,427 m<sup>3</sup>, equivalente a una reducción del 13.20 %; el escenario de disminución del consumo en 10 % produjo un ahorro de 970,357 m<sup>3</sup>, correspondiente a una reducción efectiva del 9.70 %; mientras que el escenario combinado alcanzó un ahorro de 2,154,040 m<sup>3</sup>, equivalente al 21.53% del volumen total extraído. Estos factores de reducción se aplicaron proporcionalmente a la HHAD mensual observada en 2024. De esta manera, la HHAD

del mes de menor demanda (febrero), originalmente de 775,165 m<sup>3</sup>, se reduce a 672,847 m<sup>3</sup> bajo el escenario de eficiencia, a 700,460 m<sup>3</sup> bajo el escenario de reducción de consumo y a 608,502 m<sup>3</sup> en el escenario combinado. De igual forma, la HHAD del mes de mayor demanda (noviembre), originalmente de 986,636 m<sup>3</sup>, disminuye a 856,482 m<sup>3</sup>, 891,752 m<sup>3</sup> y 774,510 m<sup>3</sup>, respectivamente (Tabla 24).

Tabla 25. Variación mensual de la HHAD en los meses de mayor y menor demanda, bajo escenarios de gestión hídrica. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de SIMAPAG

Mes	HHAD original (m <sup>3</sup> /mes)	Incremento de 10 puntos porcentuales en la eficiencia física	Disminución del 10% en el consumo	Escenario combinado
Febrero (mínima HHAD)	775,165	672,847	700,460	608,502
Noviembre (máxima HHAD)	986,636	856,482	891,752	774,510

## 6. Recomendaciones

La evidencia generada en este estudio sugiere que la transición hacia un modelo de gestión hídrica sostenible en Guanajuato Capital requiere de una estrategia integral que trascienda la visión tradicional de oferta y demanda. En primer lugar, se recomienda priorizar la modernización de la infraestructura y el control de pérdidas físicas. Los sectores identificados con eficiencias críticas, por debajo del 55%, deben ser objeto de intervenciones técnicas. Estas acciones permitirían alcanzar las metas de ahorro proyectadas en el análisis técnico, transformando las fugas actuales en volúmenes disponibles que mitiguen la necesidad de nuevas extracciones. Complementariamente, el establecimiento de programas permanentes de detección de fugas no visibles consolidaría la recuperación de caudales en la red de distribución.

En el ámbito de la gestión de la demanda, los resultados subrayan la necesidad de implementar campañas de concienciación ciudadana con un enfoque de precisión. Estas iniciativas deben dirigirse especialmente a los sectores con consumos per cápita elevados, promoviendo un cambio en los patrones de uso doméstico que permita alcanzar la reducción del 10% simulada en los escenarios de gestión.

Para consolidar la viabilidad financiera del organismo, es fundamental establecer un vínculo técnico-económico entre la eficiencia hidráulica y la asignación presupuestaria. El ahorro en facturación eléctrica, que en el escenario combinado supera los 9 millones de MXN anuales, representa un capital de oportunidad que debe ser redirigido específicamente hacia la reposición de activos y la infraestructura de distribución. Una medición periódica de la HHAD se convierte en la métrica para validar el éxito de las políticas de adaptación climática y garantizar la seguridad hídrica de la capital a perpetuidad.

## 7. Discusión

La evaluación de la HHAD del sistema de abastecimiento de Guanajuato capital permite no solo cuantificar el volumen total anual demandado, sino también analizar cómo los patrones de consumo y la eficiencia física inciden sobre la presión ejercida en fuentes superficiales y subterráneas. Los escenarios de gestión evaluados muestran que es posible reducir de manera significativa la HHAD mediante acciones orientadas tanto a la mejora de la eficiencia física como a la gestión de la demanda. En el escenario de incremento de 10 puntos porcentuales en la eficiencia física, la HHAD del mes de mayor demanda se reduce de 986,636 m<sup>3</sup> a 856,482 m<sup>3</sup>, lo que representa una disminución del 13.20 % en términos mensuales y una reducción anual total de 1,024,488 m<sup>3</sup>, equivalente al 9.75 % de la HHAD total. Por su parte, el escenario de disminución del consumo en 10 % reduce la HHAD máxima mensual a 891,752 m<sup>3</sup>, con un ahorro anual de 752,877 m<sup>3</sup>, correspondiente al 7.16 % de la HHAD.

El escenario combinado, que integra simultáneamente la mejora en la eficiencia física y la reducción del consumo, presenta el mayor impacto. En este caso, la HHAD máxima mensual disminuye a 774,510 m<sup>3</sup>, lo que equivale a una reducción del 21.53 % respecto al valor original, mientras que la reducción anual total alcanza 1,671,269 m<sup>3</sup>, es decir, el 15.90 % de la HHAD anual. De manera similar, en el mes de menor demanda (febrero), la HHAD se reduce de 775,165 m<sup>3</sup> a 672,847 m<sup>3</sup> bajo el escenario de eficiencia, a 700,460 m<sup>3</sup> bajo el escenario de reducción del consumo y a 608,502 m<sup>3</sup> en el escenario combinado.

Estos resultados evidencian que la disminución de la HHAD no solo implica una mejora hidráulica del sistema, sino también beneficios económicos directos. Considerando un costo unitario de 5.50 MXN/m<sup>3</sup> para la energía eléctrica asociada a la extracción subterránea, el escenario combinado genera un ahorro anual de 9.19 millones

de MXN únicamente por concepto de energía, lo que representa una reducción sustancial de los costos operativos, especialmente durante los meses de mayor demanda hídrica.

Estos resultados permiten cuantificar de manera explícita la mejora hidráulica del sistema y su efecto económico asociado. Considerando que el ahorro energético unitario por extracción en pozos es de 5.502 MXN por  $m^3$ , el escenario combinado implica un ahorro anual de 9.19 millones de MXN únicamente por concepto de energía eléctrica, lo que se traduce en una reducción significativa de los costos operativos durante los meses de mayor exigencia del sistema. De esta manera, la disminución de los picos mensuales de HHAD no solo reduce la presión sobre el acuífero, sino también el gasto energético asociado a la extracción subterránea.

La HHAD integra tanto el volumen consumido como las pérdidas físicas del sistema, por lo que su reducción puede lograrse mediante estrategias complementarias: disminución del consumo facturado y mejora de la eficiencia hidráulica. En este sentido, la demanda efectiva incluye tanto el consumo final como las fugas, por lo que actuar sobre ambos componentes resulta fundamental para disminuir las extracciones totales y mitigar la sobreexplotación del acuífero.

La HHAD también vincula el consumo de agua con la pérdida del recurso, evidenciando el costo tanto ambiental como social de mantener una alta demandas, en este sentido la HHAD integra la evaporación y la calidad del suministro, ayudando a calcular la vulnerabilidad del sistema urbano. Esto resulta esencial para el diseño de estrategias de adaptación ante el cambio climático y para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial el ODS 6, que prioriza el uso eficiente y equitativo del agua.

La realización continua de estudios sobre la HH y la dinámica del abastecimiento urbano son fundamentales para fortalecer la gestión hídrica en ciudades expuestas a la

variabilidad climática y a la sobreexplotación de acuíferos, como es el caso de Guanajuato capital. Este tipo de análisis ofrece una base para comprender cómo interactúan la demanda urbana, la disponibilidad superficial, las extracciones y la eficiencia del sistema, permitiendo anticipar escenarios de riesgo y priorizar medidas que reduzcan el impacto en la HHAD. Un análisis constante de los patrones de consumo y el monitoreo de los sectores ayuda a tener una mejor gestión de los recursos hídricos, promoviendo una sostenibilidad del abastecimiento a largo plazo.

## 8. Conclusiones

El sistema de abastecimiento de Guanajuato capital depende de las extracciones de la batería de pozos provenientes del acuífero Silao-Romita, así como del aporte de las tres presas Esperanza, Soledad y Mata. Estas últimas al depender de la estacionalidad de las precipitaciones, desempeñan un papel complementario, y la sostenibilidad hídrica del sistema depende en gran medida del acuífero, actualmente en estado de sobreexplotación.

La comparación interanual muestra que, en los años con mayor recarga superficial, como 2021, la HHAD alcanzó el valor anual más bajo del periodo con 9,782,749 m<sup>3</sup>/año, mientras que, en los periodos de menor disponibilidad en presas, particularmente en 2023, la HHAD se incrementó hasta 11,157,861 m<sup>3</sup>/año. La diferencia entre el año más húmedo y el más seco fue de 1,375,112 m<sup>3</sup>, lo que representa un incremento del 14.06%, evidenciando la sensibilidad del sistema ante la variabilidad climática. A escala mensual, el valor máximo registrado fue de 1,047,573 m<sup>3</sup>/mes (noviembre de 2023), mientras que el valor mínimo mensual del periodo ocurrió en 2021 (mes con menor registro), estableciendo un rango de variación superior al 20% entre condiciones extremas. En conjunto, se concluye que la HHAD está influida por la estacionalidad climática, pero sobre todo por el nivel de consumo, las pérdidas físicas y el modo de operación del sistema de abastecimiento.

Los resultados demuestran que las extracciones subterráneas constituyen la principal fuente de la HHAD, manteniéndose elevadas incluso en los meses de lluvia. Aunque las presas aportan volúmenes significativos durante la temporada húmeda, su capacidad limitada y las pérdidas por evaporación que oscilaron entre 490,000 y 775,000 m<sup>3</sup>/año, reducen su impacto en la disminución de la presión sobre el acuífero. En consecuencia, las fuentes superficiales presentan una influencia estacional y moderada,

mientras que el uso de pozos representa un componente continuo y estructural en la magnitud total de la HHAD.

Los escenarios de gestión analizados demuestran que la HHAD puede reducirse entre 7.16 % y 15.90 % mediante acciones de gestión. La mejora de la eficiencia física en 10 puntos porcentuales genera una reducción anual de 1,024,488 m<sup>3</sup>, equivalente al 9.75 % de la HHAD total. La disminución del consumo en 10 % produce una reducción de 752,877 m<sup>3</sup>/año, correspondiente al 7.16 %. La combinación de ambas medidas permite alcanzar una reducción de 1,671,269 m<sup>3</sup>/año, es decir, el 15.90 % de la HHAD, disminuyendo el valor total de 10,511,691 m<sup>3</sup> a 8,840,422 m<sup>3</sup>. Este escenario combinado representa la mayor mejora estructural del sistema y se traduce además en una reducción significativa del volumen extraído en pozos, con ahorros monetarios anuales superiores a 13.9 millones de MXN, principalmente asociados a la disminución del consumo de energía eléctrica por bombeo. En conjunto, los resultados confirman que la implementación de políticas integrales que combinen mejoras en la eficiencia física y estrategias de gestión de la demanda, se puede aliviar de manera sustancial la presión sobre el acuífero y fortalecer la sostenibilidad del sistema de abastecimiento urbano a largo plazo.

## Bibliografía

- Akdeniz, T. (2022). A case study on integrated management of water losses in Antalya, Turkey. *Water Practice and Technology*, 17(10), 2023–2030. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.110>
- Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., & Parena, R. (2016). Performance Indicators for Water Supply Services: Third Edition. *Water Intelligence Online*, 15(0). <https://doi.org/10.2166/9781780406336>
- Alifujiang, Y., Lu, N., Feng, P., & Jiang, Y. (2024). China's Urban Water Utilization Based on the Water Footprint Methodology. *Water (Switzerland)*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/w16030462>
- Allan, J. A. (1998). Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits. In *Ground Water* (Vol. 36, Number 4). <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., & W, a B. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. *Irrigation and Drainage*. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Arjen Y. Hoekstra, Ashok K. Chapagain, Maite M. Aldaya, & Mesfin M. Mekonnen. (2021). Manual de evaluación de la huella hídrica. In *Aenor*.
- Bianchini, A., Cento, F., Guzzini, A., Pellegrini, M., & Sacconi, C. (2019). Sediment management in coastal infrastructures: Techno-economic and environmental impact assessment of alternative technologies to dredging. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 248). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109332>
- Caldera Ortega, A. R., & Tagle Zamora, D. (2020). *Agua en el bajío guanajuatense* (Primera edición). Universidad de Guanajuato.
- Censo de Población y Vivienda 2020 Guanajuato*. (2023). [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825198176.pdf#page=129.99](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198176.pdf#page=129.99)

- Cerón-Hernández, V. A., Hurtado-Sánchez, I. C., Bolaños-Portilla, I. C., Figueroa-Casas, A., & Restrepo-Tarquino, I. (2020). Water footprint analysis as an indicator of sustainability in non-conventional drinking water treatment systems. *DYNA (Colombia)*, 87(213). <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.81247>
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2011). The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecological Economics*, 70(4). <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.11.012>
- Comisión Nacional del Agua. (2019). Estadísticas del Agua en México 2019. *Segob*.
- CONAGUA. (2009a). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*.
- CONAGUA. (2009b). *Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable*.
- CONAGUA. (2015). *Programa estatal hidráulico de Guanajuato*.
- CONAGUA. (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. In *Publicaciones Estadísticas y Geográficas. SINA*. <https://doi.org/978-968-817-895-9>
- CONAGUA. (2021). *Programa Hídrico Regional 2021-2024 Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico*.
- Congreso de la Unión. (1992). Ley federal sobre metrología y normalización. *Diario Oficial de La Federación, México, D.F., 1 de Julio de 1992*, (Última reforma DOF 18/12/2015).
- Díaz-Cano, E., Berbel, J., Montilla-López, N. M., & Expósito, A. (2025). Enhancing water efficiency: Distribution efficiency and consumption synergies. *Water Resources and Economics*, 50, 100260. <https://doi.org/10.1016/J.WRE.2025.100260>
- Domínguez, J. (2019). La construcción de presas en México. Evolución, situación actual y nuevos enfoques para dar viabilidad a la infraestructura hídrica. *Gestión y Política Pública*, 28(1).
- Domínguez, J. (2022, September 30). *Agua y saneamiento. Desafíos de la gobernanza de los sistemas públicos locales*. [https://sitios.congresogto.gob.mx/juntaenlace/assets/pdf/JDS\\_COLMEX.pdf](https://sitios.congresogto.gob.mx/juntaenlace/assets/pdf/JDS_COLMEX.pdf)

- Elmogahzy, Y. E. (2020). Engineering design for sustainability in the textile and garment industry. *Engineering Textiles*, 119–155. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102488-1.00006-X>
- Esquivel Alcántara, A., Salgado Vega, M. del C., & Esquivel Alcántara, S. E. (2024). *Análisis comparativo de la Huella Hídrica de consumo en las viviendas de los municipios del Área Metropolitana de Toluca, 2023*. <http://ru.iiec.unam.mx/6446>
- Fialkiewicz, W., Burszta-Adamiak, E., Kolonko-Wiercik, A., Manzardo, A., Loss, A., Mikovits, C., & Scipioni, A. (2018). Simplified direct water footprint model to support urban water management. *Water (Switzerland)*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/w10050630>
- Fox, C. A., Magilligan, F. J., & Sneddon, C. S. (2016). “You kill the dam, you are killing a part of me”: Dam removal and the environmental politics of river restoration. *Geoforum*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2016.02.013>
- George H. Hargreaves, & Zohrab A. Samani. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2). <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Gómez-Martínez, P., Cubillo-González, F., & Martín-Carrasco, F. J. (2017). Metodología para caracterizar la eficiencia de una red de distribución sectorizada. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(4). <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-04>
- Gong, B., Liu, Z., Liu, Y., & Zhou, S. (2023). Understanding advances and challenges of urban water security and sustainability in China based on water footprint dynamics. *Ecological Indicators*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110233>
- Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual Water Trade. Proceedings of the internacional expert meeting on virtual water trade. *International Expert Meeting on Virtual Water Trade*, 12(12).
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aladaya, M. M., & Mesfin M. Mekonnen. (2011). The water footprint assessment manual setting the global standard. In *Water Footprint Network*.

- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(9). <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>
- INEGI. (1980). Síntesis Geográfica de Guanajuato. In *Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática*.
- INEGI. (2022). *Aspectos geográficos de Guanajuato: Compendio 2022*.
- IPCC. (2023). Climate Change 2021 – The Physical: Science Basis. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jaramillo, C. (2017). *INFORME APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CONTABILIDAD DE HUELLA HÍDRICA DIRECTA A 15 REGIONES DE CHILE*.
- Katz, D., Grinstein, A., Kronrod, A., & Nisan, U. (2016). Evaluating the effectiveness of a water conservation campaign: Combining experimental and field methods. *Journal of Environmental Management*, 180, 335–343. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.049>
- Kohli, A., & Frenken, K. (2015). Evaporation from Artificial Lakes and Reservoirs. *FAO AQUASTAT Reports*.
- Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., Cao, Y., Carling, P., Fu, K., Guo, Q., Hotchkiss, R., Peteuil, C., Sumi, T., Wang, H., Wang, Z., Wei, Z., Wu, B., Wu, C., & Yang, C. T. (2014). Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2(5). <https://doi.org/10.1002/2013ef000184>
- Lee, F. Z., Lai, J. S., & Sumi, T. (2022). Reservoir Sediment Management and Downstream River Impacts for Sustainable Water Resources—Case Study of Shihmen Reservoir. *Water (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/w14030479>
- Liemberger, R., & Wyatt, A. (2019). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Science and Technology: Water Supply*, 19(3). <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>
- Manzardo, A., Loss, A., Fialkiewicz, W., Rauch, W., & Scipioni, A. (2016). Methodological proposal to assess the water footprint accounting of direct water

- use at an urban level: A case study of the Municipality of Vicenza. *Ecological Indicators*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.016>
- Marston, L., & Konar, M. (2017). Drought impacts to water footprints and virtual water transfers of the Central Valley of California. *Water Resources Research*, 53(7). <https://doi.org/10.1002/2016WR020251>
- Martínez, P., & Patiño, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 3(1).
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7). <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Morales-Novelo, J. A., & Rodríguez-Tapia, L. (2020). Water footprint sustainability at valley of Mexico's basin; [Sustentabilidad de la huella hídrica en la cuenca del valle de México]. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(4).
- Morbidegli, R., Saltalippi, C., Flammini, A., & Dari, J. (2025). The Effect of Awareness-Raising on Household Water Consumption. *Sustainability (Switzerland)*, 17(19). <https://doi.org/10.3390/su17198887>
- Ortega-Ballesteros, A., Iturriaga-Bustos, F., Perea-Moreno, A. J., & Muñoz-Rodríguez, D. (2022). Advanced Pressure Management for Sustainable Leakage Reduction and Service Optimization: A Case Study in Central Chile. *Sustainability (Switzerland)*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/su141912463>
- Palmieri, A., Annandale, G. W., Dinar, A., Johndrow, T. B., & Kawashima, S., Shah, F. (2003). Reservoir conservation: economic and engineering evaluation of alternative strategies for managing sedimentation in storage reservoirs. *The RESCON Approach*, (June).
- Parra-Orobio, B. A., Soto-Paz, J., Ramos-Santos, A., Sanjuan-Quintero, K. F., Saldaña-Escorcía, R., Dominguez-Rivera, I. C., & Sánchez, A. (2023). Assessment of the Water Footprint in Low-Income Urban Neighborhoods from Developing Countries: Case Study Fátima (Gamarra, Colombia). *Sustainability (Switzerland)*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/su15097115>

- Pascual Ramírez, R., López Quiroz, M., Chablé Pech, L. A., Loranca Domínguez, Y., Ledesma Ledesma, J. I., Zavala Fajardo, A. G., & Martínez Melgarejo, A. E. (2021). *Reporte del Clima en México*.
- Paterson, W., Rushforth, R., Ruddell, B. L., Konar, M., Ahams, I. C., Gironás, J., Mijic, A., & Mejia, A. (2015). Water footprint of cities: A review and suggestions for future research. *Sustainability (Switzerland)*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/su7078461>
- Pedrozo Acuña, A. (2022). Huella hídrica: indicador clave para la planeación prospectiva del agua. *Perspectivas IMTA*, 3(35). <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2022-35>
- Ramos-Bueno, A., Galeana-Pizaña, J. M., & Perevochtchikova, M. (2024). Urban water consumption analysis through a spatial panel modeling approach: a case study of Mexico City, 2004–2022. *Water Supply*, 24(9), 3179–3195. <https://doi.org/10.2166/WS.2024.191>
- Rosa, L., Chiarelli, D. D., Rulli, M. C., Dell'Angelo, J., & D'Odorico, P. (2020). Global agricultural economic water scarcity. *Science Advances*, 6(18). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz6031>
- Rosińska, W., Jurasz, J., Przestrzelska, K., Wartalska, K., & Kaźmierczak, B. (2024). Climate change's ripple effect on water supply systems and the water-energy nexus – A review. *Water Resources and Industry*, 32, 100266. <https://doi.org/10.1016/J.WRI.2024.100266>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018. In *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). *Compendio de estadísticas ambientales*.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2024). *Reporte del Clima en México Anual 2023*. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)
- Shiguetomi, A. (2016). *Evaluación de la huella hídrica: a través del ciclo de vida en vivienda unifamiliar de San Luis Potosí* [Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/5796>

UN. (2015). Resolution adopted by the General Assembly: transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*, 16301(October).

UNESCO. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. In *Unesco*. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/es>

UNESCO. (2023a). The United Nations World Water Development Report 2023. In *Handbook of Water Purity and Quality*.

UNESCO. (2023b). The United Nations World Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water. In *Handbook of Water Purity and Quality*.