



Estimación del déficit hídrico en el abastecimiento de agua en la Zona Metropolitana de Pachuca

Guerrero Escamilla, J. B. y Rangel Martínez, Y. (2026). Estimación del déficit hídrico en el abastecimiento de agua en la Zona Metropolitana de Pachuca. [*Postprint*].

CIENCIA *ergo-sum*, 33.

<https://doi.org/10.30878/ces.v33n0a75>

Sección: Ciencias Naturales y Agropecuarias

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

Estimación del déficit hídrico en el abastecimiento de agua en la Zona Metropolitana de Pachuca

Estimation of the water deficit for the water supply system in the Pachuca Metropolitan Area

Juan Bacilio Guerrero Escamilla, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.

Correo electrónico: juan_guerrero9464@uaeh.edu.mx

ORCID: 000-0002-0971-7564

Yamile Rangel Martínez, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.¹

Correo electrónico: profe_6771@uaeh.edu.mx

ORCID: 0000-0001-8117-3218

Recepción: 7 de julio de 2025

Aprobación: 7 de enero de 2026

RESUMEN

Se analizan las tendencias del déficit hídrico en la Zona Metropolitana de Pachuca (ZMP) mediante el desarrollo del modelo matemático basado en técnicas de regresión gamma y escalamiento multidimensional. El estudio plantea la hipótesis de las ineficiencias operativas influyen significativamente en los niveles de déficit hídrico y que, mediante la identificación de variables clave, se pueden optimizar las estrategias de gestión.

Los resultados muestran un desequilibrio crítico: el déficit hídrico mensual real (2.2 millones de m³) es 125 veces mayor que el nivel óptimo esperado (17,500 m³). El modelo explica el 92.81% de la variabilidad del déficit e identifica factores clave: horas de bombeo (HOB), la expansión de infraestructura sin planificación (IFP) y la eficiencia de distribución y comercialización (DCA).

PALABRAS CLAVE: Déficit hídrico, Gestión del agua, Eficiencia operativa, Regresión gamma.

ABSTRACT

This paper analyses water deficit trends in the Pachuca Metropolitan Area (PMA) by developing a mathematical model based on gamma regression and multidimensional scaling techniques. The study hypothesizes that operational inefficiencies significantly influence water deficit levels and that by identifying key variables, management strategies can be optimized.

Results show a critical imbalance: the actual monthly water deficit (2.2 million m³) is 125 times higher than the optimal expected level (17,500 m³). The model explains 92.81% of the deficit variability and identifies key factors such as hours of pumping (HOB), infrastructure expansion without planning (IFP), and distribution and commercialization efficiency (DCA).

¹ Autor para correspondencia.

This approach provides CAASIM with a predictive tool to reduce the deficit, improve operational efficiency, and support sustainable decision-making for water governance in urban contexts.

KEYWORDS: Water déficit, Water management, Operational efficiency, Gamma regression.

INTRODUCCIÓN

La Zona Metropolitana de Pachuca (ZMP) se ubica en el centro del estado de Hidalgo y está integrada por 14 municipios: Pachuca de Soto, Mineral de la Reforma, Zempoala, Epazoyucan, Mineral del Monte, Singuilucan, Tlanalapa, Villas de Tezontepec, San Agustín Tlaxiaca, Tolcayuca, El Arenal, Tepeapulco, Zapotlán de Juárez y Mineral del Chico.

Según el Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2021), la ZMP concentra aproximadamente 950,000 habitantes, con una proyección de superar 1.2 millones para 2030, lo que implica un crecimiento acelerado que ejerce presión sobre la infraestructura y los servicios públicos. Este crecimiento ha sido en gran parte desordenado, con patrones de expansión urbana que han provocado una elevada demanda de agua potable y una sobreexplotación del acuífero Cuautitlán-Pachuca, la principal fuente de abastecimiento.

Actualmente, este acuífero tiene un déficit anual de recarga superior a 30 millones de metros cúbicos, situándolo entre los más sobreexplotados del país (CONAGUA, 2022). A ello se suman problemas de eficiencia operativa, pérdidas por fugas y altos volúmenes de agua no contabilizada, que en conjunto han generado una crisis estructural en el sistema hídrico regional.

La región centro del país enfrenta un escenario de estrés hídrico severo. De acuerdo con CONAGUA (2023), más del 60% del territorio nacional presenta algún grado de estrés hídrico, siendo el estado de Hidalgo una de las entidades con mayores retos por la sobreexplotación de acuíferos y la creciente demanda de agua potable.

En la ZMP, este problema se refleja en la disminución de la disponibilidad de agua per cápita, fallas en el servicio y conflictos sociales por la distribución desigual del recurso. Estos desafíos se ven agravados por el cambio climático, que ha intensificado sequías prolongadas

y eventos extremos, afectando la recarga natural de los acuíferos y elevando los costos de operación de los sistemas de abastecimiento.

La Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales (CAASIM), encargada del suministro en los 14 municipios, enfrenta importantes desafíos derivados de la sobreexplotación del acuífero Cuautitlán-Pachuca, fugas, infraestructura deficiente y consumo creciente. Ante este contexto, se diseñó un modelo matemático que permita estimar el déficit de agua (Y), como una forma de apoyar la planeación basada en evidencia.

El abastecimiento eficiente y sustentable de agua potable representa uno de los mayores desafíos para la gestión pública en contextos urbanos, particularmente en regiones que experimentan estrés hídrico creciente, como es el caso de la Zona Metropolitana de Pachuca (ZMP). Este fenómeno se agrava por la sobreexplotación de acuíferos, el crecimiento poblacional desordenado y las deficiencias en la infraestructura hidráulica (CONAGUA, 2022).

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), para el año 2030 se prevé que cerca de 700 millones de personas podrían verse desplazadas por escasez de agua, lo que convierte a este recurso en una prioridad para la seguridad humana y el desarrollo sostenible (ONU-Agua, 2021). En este sentido, los modelos de predicción del déficit hídrico basados en indicadores operativos son herramientas cruciales para la toma de decisiones en organismos operadores de agua potable.

A nivel nacional, México enfrenta una situación crítica: más del 60% del territorio presenta algún grado de estrés hídrico, siendo el acuífero Cuautitlán-Pachuca uno de los más sobreexplotados del país (IMTA, 2023). Pese a ello, son escasos los estudios que integren análisis multivariados y modelos matemáticos robustos para estimar tendencias del déficit a escala subregional, como lo demanda la realidad de municipios interconectados administrativamente por organismos como CAASIM.

Desde una perspectiva de gobernanza ambiental, el uso de técnicas estadísticas avanzadas para modelar el déficit del agua permite fortalecer la planeación basada en evidencia y mejorar la eficiencia operativa en la gestión del recurso (Gleick, 2020). Asimismo, la construcción de indicadores compuestos que integren variables como pérdidas por fugas,

consumo energético y comportamiento tarifario responde a la necesidad de una visión integral del sistema hídrico, alineada con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 de la Agenda 2030 (UNESCO-WWAP, 2022).

Por tanto, este estudio contribuye al cierre de una brecha crítica en la literatura y en la práctica operativa, al proporcionar un modelo de análisis replicable, estadísticamente validado y con capacidad predictiva, el cual puede ser útil tanto para CAASIM como para otros organismos operadores en contextos similares.

La Zona Metropolitana de Pachuca (ZMP), conformada por municipios como Pachuca, Mineral de la Reforma, Zempoala y Epazoyucan, entre otros, es abastecida principalmente por el acuífero Cuautitlán-Pachuca, el cual se encuentra clasificado como sobreexplotado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2022). Este acuífero presenta una extracción anual significativamente mayor a su recarga natural, lo que ha derivado en un desequilibrio hídrico cada vez más difícil de revertir.

Además de la presión sobre la fuente, se suman ineficiencias operativas que afectan la calidad y cantidad del suministro, como las fugas en tomas y líneas, las pérdidas comerciales, la limitada infraestructura de tratamiento y distribución, y la deficiente recuperación de caudales (IMTA, 2023). Estas condiciones reducen considerablemente la eficiencia del organismo operador, en este caso la Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales (CAASIM), lo cual impacta de manera directa en el bienestar de la población y en la sostenibilidad del sistema hídrico urbano.

Con base en lo anterior, el objetivo central de la presente investigación es:

Estimar la tendencia del déficit hídrico en el abastecimiento de agua potable en la Zona Metropolitana de Pachuca mediante la aplicación de un modelo matemático de regresión gamma, mediante la identificación de los factores operativos que inciden significativamente en su comportamiento y proponer estrategias de mejora en la eficiencia del sistema de suministro administrado por CAASIM.

Partiendo del objetivo central, la pregunta de investigación es:

¿Cuáles son los factores operativos que explican significativamente la tendencia del déficit

hídrico en la Zona Metropolitana de Pachuca, y cómo pueden ser modelados matemáticamente para mejorar la eficiencia del abastecimiento de agua potable?

La presente investigación se sustenta en la Metodología de Investigación de Operaciones, en la cual, el modelo matemático a construir se desarrolla en 4 etapas (Taha, 2012):

Etapla I. Planteamiento del problema: se describe el comportamiento del fenómeno en estudio, y con ello, se identifican las variables dependiente e independiente, mediante la formulación matemática del fenómeno, así con la búsqueda de los datos que conforman a las variables del estudio.

Etapla II. Cálculo de parámetros: mediante el planteamiento de la relación lineal entre las variables dependiente e independiente, se procede a la estimación de los parámetros del modelo, mediante la aplicación de técnica de regresión gamma, con la finalidad de obtener la ecuación matemática representativa del fenómeno en estudio.

Etapla III. Validación del modelo: una vez obtenida la ecuación matemática, se procede al cumplimiento de los supuestos de inferencia de estadística de los Modelos Lineales Generalizados (GAM)².

Etapla IV. Interpretación de resultados: con la ecuación matemática obtenida, se procede a la lectura de los parámetros, así como, la construcción de escenarios del fenómeno en estudio.

La falta de estudios que integren variables técnicas y operativas en modelos estadísticos y matemáticos impide la adecuada caracterización del déficit en muchas regiones del país. Por ello, resulta urgente desarrollar instrumentos que permitan no solo estimar el déficit hídrico de manera precisa, sino también identificar los factores estructurales que lo provocan, para poder intervenir con estrategias efectivas y sostenibles.

1.SUSTENTO TEÓRICO

El agua es un recurso vital e insustituible para la vida y el desarrollo socioeconómico. La

² Los Modelos Lineales Generalizados (GAM) son una extensión de los modelos lineales que utilizan distribuciones no normales en los residuales (errores) (binomial, poisson, gamma, entre otras) y varianza no controlada. Por lo regular, la variable dependiente carece del cumplimiento de dos supuestos del modelo normal, esto se presenta cuando los datos son conteos, nominales o ordinales, con la presencia de datos atípicos (McCullagh & Nelder, 2019).

Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoce el acceso al agua potable segura y al saneamiento como un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos (ONU-Agua, 2023). No obstante, millones de personas en el mundo aún carecen de acceso adecuado a este recurso, debido a factores estructurales, operativos y ambientales.

El déficit hídrico se refiere a la diferencia entre la cantidad de agua disponible y la demanda efectiva de la población, considerando tanto aspectos de volumen como de calidad (Sharma et al., 2021). Este fenómeno se encuentra estrechamente vinculado con el estrés hídrico, definido por la FAO como la condición en la que más del 25% del total de los recursos hídricos renovables se extraen para uso humano (FAO, 2021). En México, más del 60% del territorio presenta algún grado de estrés hídrico, y 157 de los 653 acuíferos monitoreados están sobreexplotados (CONAGUA, 2022).

La gobernanza del agua implica la articulación de normas, políticas, instituciones y prácticas orientadas a garantizar el acceso sostenible al recurso. Una de las variables clave en esta gobernanza es la eficiencia operativa de los organismos operadores de agua, medida a través de indicadores como las pérdidas físicas (fugas), pérdidas comerciales (no facturación) y los volúmenes de agua no contabilizada (WB, 2020).

La eficiencia técnica y comercial está directamente relacionada con la capacidad de un organismo para garantizar un suministro continuo y sostenible, donde la identificación y cuantificación de las pérdidas en sistemas hidráulicos es una estrategia crucial para mejorar la eficiencia y reducir el déficit hídrico.

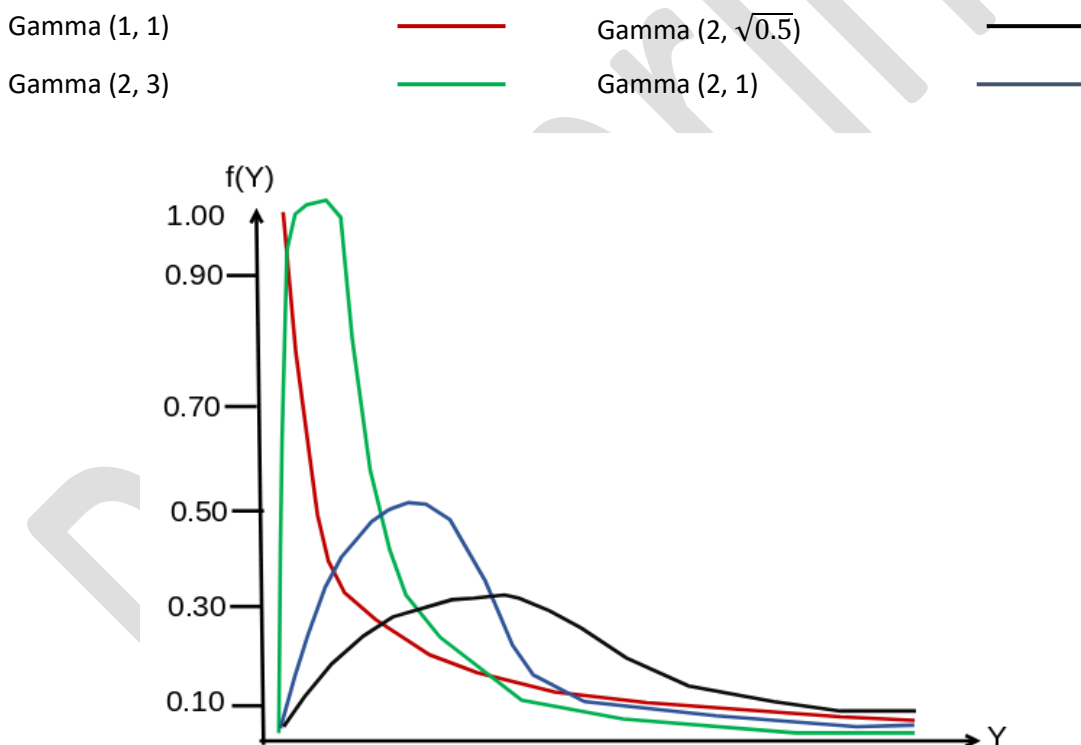
La Zona Metropolitana de Pachuca depende en gran medida del acuífero Cuautitlán-Pachuca, clasificado como sobreexplotado desde hace más de una década (IMTA, 2023). CAASIM, como organismo operador, enfrenta múltiples desafíos relacionados con la antigüedad de la infraestructura, la presencia de fugas, la falta de macro medición y la limitada recuperación de costos. Estudios recientes destacan la necesidad de integrar metodologías cuantitativas en la planeación del recurso hídrico urbano, particularmente en zonas donde las fuentes de agua están al límite de su capacidad de recarga (González-Ramírez et al., 2022).

El uso de modelos matemáticos para simular el comportamiento de sistemas hídricos urbanos

ha cobrado relevancia en las últimas décadas, ya que permiten integrar grandes volúmenes de datos y estimar tendencias de manera precisa. Entre los modelos más utilizados destacan la regresión lineal, la regresión gamma, los modelos probabilísticos y las herramientas de análisis multivariado (Sahuquillo et al., 2020).

Si Y (déficit del agua) es una variable aleatoria continua, tal que $Y \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ donde $0 \leq f(Y) \leq 1$, el comportamiento de Y es (Wackerly, Mendenhall y Scheaffer, 2008):

Gráfica 1
Distribución de probabilidad Gamma



Fuente. Estadística Matemática con Aplicaciones (Wackerly, Mendenhall y Scheaffer, 2008)

Si $Y \sim \text{Gamma}(\alpha, \lambda)$ tal que su regresión lineal es (McCullagh & Nelder, 2019):

$$E(Y) = \phi \left[B_o + \sum_{i=1}^k B_i X_i + u_i \right] \quad (1)$$

Donde:

- ϕ se le conoce como la función liga.
- B_o y B_i son los parámetros a estimar mediante máxima verosimilitud.
- U_i es el margen de error que no puede ser explicado por la relación lineal.

Sacando la matriz inversa del $E(Y)$ (McCullagh & Nelder, 2019):

$$\phi^{-1}[E(Y)] = B_o + \sum_{i=1}^k B_i X_i + u_i \quad (2)$$

Tal que:

$$\text{Identidad} \quad [E(Y)] = B_o + \sum_{i=1}^k B_i X_i + u_i \quad (3)$$

$$\text{Logarítmica} \quad \ln[E(Y)] = B_o + \sum_{i=1}^k B_i X_i + u_i \quad (4)$$

$$\text{Inversa} \quad \frac{1}{E(Y)} = B_o + \sum_{i=1}^k B_i X_i + u_i \quad (5)$$

Cuyo ajuste se obtiene mediante la Devianza (D2) ():

$$D^2 = \frac{DN - DR}{DN} ; \text{ tal que } 0 \leq D^2 \leq 1 \quad (6)$$

Donde:

- DN = Devianza nula.
- DR = Devianza de los residuales.

Bajo el cumplimiento de los siguientes supuestos (McCullagh & Nelder, 2019):

- Criterio de Información Akaike (AIC): compara modelos y el que tenga menor AIC, mejor ajuste.

- Los ui debe aproximarse a los residuales de la devianza, es decir, los ui deden distribuirse a una ji – cuadrada (χ^2).
- No colinealidad entre las variables independientes. Si el VIF (Factor de Inflación de la Varianza) es menor a 10 unidades, no existe colinealidad.

Por tanto, es adecuada para variables continuas y estrictamente positivas, como es el caso del déficit hídrico, y permite modelar relaciones no lineales entre múltiples factores explicativos (McCullagh & Nelder, 2019). Estas herramientas contribuyen a una gestión más proactiva y prospectiva del recurso, ayudando a predecir escenarios críticos y optimizar decisiones.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Zona Metropolitana de Pachuca (ZMP) comprende 14 municipios del estado de Hidalgo, México: Pachuca de Soto, Mineral de la Reforma, Zempoala, Epazoyucan, Mineral del Monte, Singuilucan, Tlanalapa, Villas de Tezontepec, San Agustín Tlaxiaca, Tolcayuca, El Arenal, Tepeapulco, Zapotlán de Juárez y Mineral del Chico. Esta región es abastecida principalmente por el acuífero Cuautitlán-Pachuca y operada hidráulicamente por CAASIM.

Los datos fueron proporcionados por CAASIM y corresponden al periodo enero de 2019 a diciembre de 2021, con frecuencia mensual. Las variables consideradas incluyen parámetros técnicos, volumétricos, tarifarios y de infraestructura:

- | | |
|-------------------------------|--|
| • X3 = Caudal | • X10 = Energía consumida |
| • X4 = Horas de bombeo | • X11 = Volumen distribuido |
| • X5 = Fugas en líneas | • X12, X13 y X14 = Pérdidas volumétricas |
| • X6 = Tomas | • X15 = Facturado |
| • X7 = Total de tomas | • X16 y X17 = Tarifas |
| • X8 y X9 = Longitud de redes | |

Aplicando la técnica de escalamiento multidimensional (minimización del conjunto de datos y agrupación de variables con patrones de similitud (Peña, 2022)). Dando como resultado cinco indicadores sintéticos que explican la variabilidad del sistema:

- **DCA** = Distribución y Comercialización del Agua

- **PTL** = Pérdidas en Tomas y Líneas
- **IFP** = Infraestructura y Planeación
- **HOB** = Horas de Bombeo
- **TAF** = Tarifas

Por tanto el valor esperado del déficit del agua es:

$$E(Y) = f(T, DCA, PTL, IFP, HOB, TAF) \quad (7)$$

En forma de regresión lineal de la gamma:

$$\phi^{-1}[E(Y)] = B_0 + B_1T + B_2DCA + B_3PTL + B_4IFP + B_5HOB + B_6TAF + u_i \quad (8)$$

Donde:

- $\phi^{-1}[E(Y)]$ = Es la función liga del valor esperado del déficit del agua.
- T = Es el tiempo mensual de enero de 2019 a diciembre de 2021
- B_i Tal que $i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$, y 6 son los parámetros a estimar.
- u_i = Es el margen de error.

3. CÁLCULO DE PARÁMETROS

Con base en lo anterior y mediante la matriz correlación se tiene lo siguiente (Cuadro 1):

Cuadro 1
Matriz de correlación lineal entre el Déficit del Agua (Y) y los indicadores del Eficiencia del abastecimiento del Agua

Y	0.00	0.40	0.48	0.71	0.39	-0.10
0.00	T	0.07	0.07	0.05	0.07	0.00
0.40	0.07	DCA	0.98	0.85	0.87	-0.14
0.48	0.07	0.98	PTL	0.91	0.80	-0.14
0.71	0.05	0.85	0.91	IEP	0.60	-0.14
0.39	0.07	0.87	0.80	0.60	HOB	-0.13
-0.10	0.00	-0.14	-0.14	-0.14	-0.13	TAF

Fuente. Elaboración propia.

Partiendo de la figura 2, se puede observar que con un nivel de confianza del 0.95 y un nivel

de significancia del 0.05, los indicadores T (tiempo) y TAF (indicador de Tarifas) no son significativos para estimar el comportamiento de Y (déficit de Agua), por tanto, su expresión algebraica sería de la siguiente forma:

$$\phi^{-1}[E(Y)] = B_0 + B_1 DCA + B_2 PTL + B_3 IFP + B_4 HOB + u_i \quad (9)$$

Mediante la estandarización de la información, el modelos serían de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \ln[E(Y + 44003)] & \quad (10) \\ &= B_0 + B_1 \ln(DCA) + B_2 \ln(PTL) + B_3 \ln(IFP) \\ &+ B_4 \ln(HOB) + u_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln[E(Y + 44003)] & \quad (11) \\ &= B_0 + B_1 \sqrt{(DCA)} + B_2 \sqrt{(PTL)} + B_3 \sqrt{(IFP)} + B_4 \sqrt{(HOB)} \\ &+ u_i \end{aligned}$$

Partiendo de lo anterior, las siguientes corridas son (Cuadro 2):

Cuadro 2
Corrida de modelos con variables significativas

Modelo 1						Modelo 2					
Deviance Residuals:						Deviance Residuals:					
Min	1Q	Median	3Q	Max		Min	1Q	Median	3Q	Max	
-34.166	-0.427	-0.103	0.253	8.648		-35.993	-0.323	-0.068	0.202	9.946	
Coefficients:						Coefficients:					
	Est	Std	Z	P-V			Est	Std	Z	P-V	
Inter	7.406	0.026	278	2e-16	***	Inter	7.443	0.025	291	2e-16	***
ln(DCA)	0.105	0.041	2.55	0.011	*	$\sqrt{DCA}$	-0.193	0.026	-7.38	e-16	***
ln(PTL)	-1.210	0.051	-23.4	2e-16	***	$\sqrt{PTL}$	-0.441	0.029	-14.9	2e-16	***

ln(IFP)	2.276	0.025	89.6	2e-16	***	$\sqrt{\text{IFP}}$	1.295	0.014	87.3	2e-16	***
ln(HOB)	0.598	0.014	41.7	2e-16	***	$\sqrt{\text{HOB}}$	0.687	0.014	49.1	2e-16	***
Null deviance: 32091.6 on 2447 degrees of freedom						Null deviance: 36998.7 on 2447 degrees of freedom					
Residual – dev: 2631.5 on 2439 degrees of freedom						Residual – dev: 2659.8 on 2439 degrees of freedom					
AIC: 50787						AIC: 50464					

Fuente. Elaboración propia.

A partir de la figura 3, se puede observar que el modelo 2 presenta mejor ajuste, pues con base al Criterio de Información de Akaike (AIC) es el más bajo, aunado a esto, con un nivel de confianza del 0.95 y con un nivel de significancia del 0.05, se puede observar las variable de DCA, SOHSR, PTL, IFP y HOB son significativas para estimar el valor esperado del Deficit del Agua (Y). Por tanto, la ecuación lineal sería de la siguiente forma:

$$\ln[E(Y + 44003)] \quad (12)$$

$$= 7.44 - 0.19\sqrt{\text{DCA}} - 0.44\sqrt{\text{PTL}} + 1.29\sqrt{\text{IFP}} + 0.69\sqrt{\text{HOB}}$$

4.VALIDACIÓN DEL MODELO

Partiendo de la expresión algebraica 12, se procede la validación del modelo, es decir al cumplimiento de los siguientes supuestos: los ui debe aproximarse a los residuales de la devianza, no colinealidad entre las variables independientes, y el grado de ajuste a partir de la devianza.

- Los residuales (ui) deben aproximarse a sus grados de libertad:

Null deviance: 36998.7 on 2447 degrees of freedom
Residual deviance: 2659.8 on 2443 degrees of freedom

Hipótesis:

Ho: $u_i \sim GL$ vs. Ha: $u_i \neq GL$

Si el P – Valor es mayor a 0.05 se rechaza Ha y se acepta Ho, por tanto, los ui se aproximan a sus grados de libertad. Con base a los resultados, el P – Valor es igual a uno, por tanto se

acepta H_0 , es decir, los residuales de aproximan a sus grados de libertad.

- Factor de Inflación de la Varianza (VIF). Si el VIF es mayor a cinco unidades, va a existir colinealidad entre las variables independientes. Partiendo de los resultados obtenidos:

	$\sqrt{DCA}$	$\sqrt{PTL}$	$\sqrt{IFP}$	$\sqrt{HOB}$
VIF	4.513	2.573	2.338	3.686

Se puede ver que no existe colinealidad entre las variables independientes.

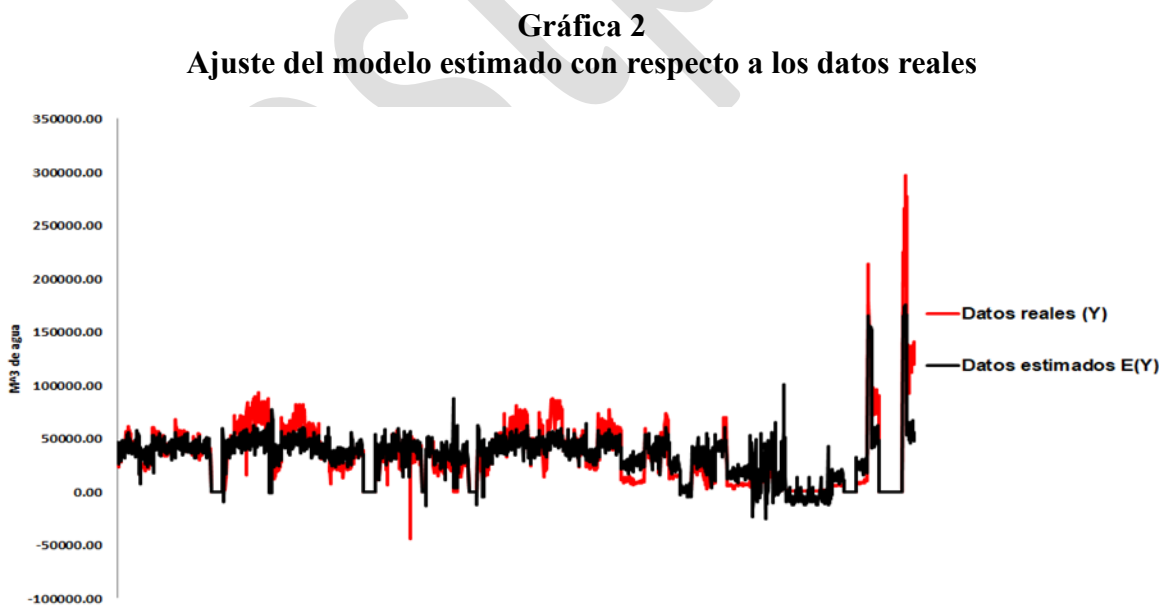
- Devianza (D^2). Sustituyendo:

$$D^2 = \frac{DN - DR}{DN} = \frac{36998.7 - 2659.8}{36998.7} = \frac{34338.9}{36998.7} = 0.9281 \quad (13)$$

Con el cumplimiento de los supuestos, el retroceso de la ecuación (12) es el siguiente:

$$E(Y) = 1702.75e^{-0.19\sqrt{DCA}-0.44\sqrt{PTL}+1.29\sqrt{IFP}+0.69\sqrt{HOB}} - 44003 \quad (14)$$

Gráficamente (Gráfica 2):



Fuente. Elaboración propia.

Por tanto, con un nivel de confianza al 0.95, con un nivel de significancia del 0.05 y con el cumplimiento de los supuestos de inferencia estadística, el presente modelo conserva el

92.81% de la variabilidad de los datos, es decir, la expresión algebraica 14 explica en un 92.81% el comportamiento del déficit del Agua.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los parámetros estimados permiten interpretar los siguientes impactos sobre el déficit hídrico mensual:

- **DCA:** Por cada unidad adicional reduce el déficit en 294.65 m^3 (~295 mil litros por día).
- **PTL:** Un incremento en pérdidas reduce el déficit aparente en 606.15 m^3 , indicando probablemente una subestimación por fuga no registrada como consumo.
- **IFP:** Un aumento en infraestructura incrementa el déficit en $4,482.9 \text{ m}^3$ (~4.48 millones de litros por día), reflejando ineficiencia operativa.
- **HOB:** Cada hora adicional de bombeo se asocia con un aumento de $1,992.06 \text{ m}^3$ (~1.99 millones de litros por día).

En total, el déficit estimado promedio mensual asciende a 2.2 millones de m^3 , 125 veces mayor que el valor óptimo esperado de 17.5 mil m^3 , evidenciando una crisis estructural en el sistema de abastecimiento.

El modelo estima que el déficit óptimo esperado para CAASIM sería de aproximadamente $17,500 \text{ m}^3/\text{mes}$, sin embargo, los datos reales indican un déficit promedio mensual de 2.2 millones de m^3 , es decir, 125 veces más alto que el valor estimado bajo condiciones ideales. Esto representa una situación crítica que compromete tanto la sustentabilidad del recurso como la calidad del servicio a la población.

El comportamiento del déficit en el periodo 2019–2021 mostró una tendencia oscilante, con un punto crítico de aumento entre julio de 2020 y enero de 2021, coincidiendo con el incremento en las horas de bombeo y la expansión de infraestructura sin control proporcional del volumen facturado. Posteriormente, se observó una ligera disminución relacionada con mejoras en el indicador de distribución y comercialización.

Los resultados reflejan que la eficiencia en la distribución y comercialización tiene un efecto correctivo importante sobre el déficit. En contraste, la expansión de infraestructura sin controles adecuados y el aumento de horas de bombeo agravan el problema. Esto evidencia

una lógica de operación reactiva, que debe transitar hacia una planeación prospectiva basada en el control de fugas, mantenimiento preventivo y gestión inteligente de los caudales.

El modelo también permite identificar que la operación del sistema Real del Monte es particularmente crítica, por lo que su revisión técnica debe ser prioritaria.

Los resultados obtenidos en este estudio reflejan con claridad la complejidad estructural del déficit hídrico que enfrenta la Zona Metropolitana de Pachuca (ZMP), particularmente en lo que respecta a la gestión operativa de los sistemas hidráulicos bajo la administración de CAASIM. El déficit hídrico observado, 125 veces mayor al estimado bajo condiciones de eficiencia, revela un sistema en crisis que requiere intervenciones urgentes tanto en infraestructura como en gestión y política pública.

5.1. Comparación con estudios previos

Este fenómeno no es exclusivo de la ZMP. Otras zonas metropolitanas del centro del país, como la Zona Metropolitana del Valle de México y la Zona Metropolitana de Querétaro, enfrentan desafíos similares relacionados con la sobreexplotación de acuíferos, la baja eficiencia operativa y la falta de coordinación intermunicipal. Sin embargo, la ZMP destaca por su alto déficit relativo frente a su tamaño poblacional, lo que la convierte en un caso prioritario para la política hídrica regional.

Diversos trabajos han demostrado que la eficiencia operativa de los organismos de agua en México se ve severamente limitada por fugas físicas, pérdidas comerciales y falta de recuperación de costos (González-Ramírez et al., 2022). Este estudio confirma tales hallazgos, y además aporta una cuantificación del impacto de cada uno de estos factores en el déficit, lo cual no había sido documentado con precisión para la ZMP.

La regresión gamma aplicada mostró que la distribución y comercialización del agua (DCA) tiene un efecto correctivo sobre el déficit, ya que cada unidad de mejora en este indicador reduce casi 300 mil litros por día del déficit mensual. Este resultado valida la hipótesis de que una mejor facturación, medición y recuperación del servicio tiene efectos positivos inmediatos en el balance hídrico operativo (World Bank, 2020).

En contraste, se encontró que la expansión de infraestructura sin planificación estratégica

(IFP) agrava el déficit, al generar sobrecarga en los sistemas sin reducir pérdidas o mejorar el suministro efectivo. Este hallazgo concuerda con estudios de contextos urbanos similares donde se ha observado que la inversión no planificada en infraestructura hidráulica puede resultar contraproducente si no va acompañada de un control de fugas y optimización energética (Sharma et al., 2021).

El efecto de las horas de bombeo (HOB) también fue revelador: si bien podría esperarse que mayor bombeo aumentara el volumen disponible, en realidad incrementa el déficit, lo que sugiere que gran parte del agua extraída no está llegando a los usuarios, probablemente por fugas, evaporación o pérdidas no contabilizadas. Este patrón es característico de sistemas con baja eficiencia hidráulica y altos niveles de agua no facturada (WB, 2020).

Adicionalmente, se identificó al sistema Real del Monte (SOHSR) como un punto crítico dentro del conjunto de sistemas operativos. Su contribución directa al incremento del déficit implica que debe ser objeto de una revisión técnica exhaustiva, incluyendo la evaluación de presiones, fugas y eficiencia energética.

5.2. Implicaciones para la política pública

Los resultados obtenidos no solo permiten entender el déficit como una falla en el balance de extracción y demanda, sino como un fenómeno asociado directamente a la gestión institucional, la calidad de los procesos operativos y la toma de decisiones administrativas. En este sentido, la eficiencia no puede ser tratada como una variable secundaria, sino como el eje central de cualquier estrategia hídrica sostenible.

Este modelo puede servir como base para una gestión predictiva, es decir, para anticipar escenarios de crisis en lugar de responder reactivamente a ellos. La posibilidad de identificar los indicadores con mayor peso estadístico en la generación del déficit habilita a CAASIM y a otros organismos operadores a orientar sus recursos de manera más precisa y estratégica.

La utilidad del modelo es extensible a otras zonas metropolitanas con características similares, por lo que puede ser replicado o adaptado en otros contextos. Además, su naturaleza estadística y matemática lo hace compatible con plataformas de inteligencia institucional y sistemas de monitoreo en tiempo real.

Aunque el modelo explica una proporción considerable del fenómeno (92.81%), existen elementos no contemplados en este análisis, como variables meteorológicas (precipitación, temperatura), dinámicas sociales (cultura del agua, morosidad) o políticas (cambios tarifarios, regulación). Incluir estos factores en futuras versiones del modelo podría mejorar su capacidad explicativa y fortalecer su utilidad para la planificación integral del recurso hídrico.

PROSPECTIVA

El déficit hídrico en zonas urbanas no solo representa una falla estructural del presente, sino también una amenaza latente para el futuro del desarrollo sostenible, la salud pública y la gobernanza ambiental. En este estudio, se logró estimar y comprender el comportamiento del déficit hídrico en la Zona Metropolitana de Pachuca (ZMP) a partir de un modelo matemático predictivo, lo que permite proyectar escenarios de mediano y largo plazo con base en evidencia empírica. Este apartado se centra en la prospectiva operativa, ambiental e institucional del fenómeno analizado, con el fin de construir rutas de acción anticipada y articulada.

ESCENARIOS PROYECTADOS AL 2030

Con base en la tendencia observada entre 2019 y 2021, y sin modificaciones sustanciales en los patrones de gestión, el modelo sugiere que el déficit hídrico podría continuar aumentando entre un 4% y un 6% anual, acumulando para 2030 un volumen superior a 28 millones de m³ de agua no suministrada ni facturada en la ZMP. Esto implicaría una presión creciente sobre el acuífero Cuautitlán-Pachuca, mayores costos energéticos, y una mayor conflictividad social en colonias con abasto intermitente.

Si no se actúa con prontitud, el modelo sugiere un escenario indeseable caracterizado por:

- Estrés hídrico permanente en al menos 8 de los 14 municipios.
- Disminución de hasta el 15% en la eficiencia operativa de CAASIM.
- Mayor dependencia de fuentes externas o de costosa importación de agua.
- Riesgos sanitarios en población vulnerable debido a la irregularidad del servicio.

OPORTUNIDADES DE TRANSICIÓN HACIA ESCENARIOS DESEABLES

El conocimiento generado en este estudio puede alimentar sistemas de planeación hídrica con base en ciencia de datos, facilitando la transición hacia un escenario deseable donde el déficit se estabilice e incluso disminuya. Esto es posible si se implementan políticas y programas basados en los siguientes principios:

- Anticipación tecnológica: uso de sensores, telemetría y sistemas de inteligencia artificial para detección de fugas, control de presiones y eficiencia energética.
- Reconfiguración institucional: incorporación de células técnicas prospectivas en CAASIM, que usen modelos como el aquí propuesto para simular el efecto de diferentes decisiones operativas.
- Educación y cultura del agua: fortalecimiento de programas dirigidos a usuarios para racionalizar el consumo, valorar el servicio y aceptar nuevos esquemas tarifarios progresivos.
- Integración regional: desarrollo de esquemas metropolitanos de gobernanza hídrica que trasciendan el enfoque municipal fragmentado y promuevan decisiones coordinadas en torno a la resiliencia hídrica.

RELEVANCIA TRANSDISCIPLINARIA

Los hallazgos y la metodología de este estudio pueden extenderse a otras áreas de investigación y política pública. Por ejemplo, el modelo puede adaptarse para:

- Evaluar el impacto del cambio climático en la disponibilidad hídrica regional.
- Simular escenarios de migración por escasez hídrica en zonas periurbanas.
- Diseñar mecanismos de financiamiento sustentable para infraestructura hídrica.
- Apoyar la evaluación de políticas tarifarias diferenciales con enfoque en justicia ambiental.

Además, desde una perspectiva universitaria, este estudio ofrece una oportunidad para

repensar la enseñanza y la práctica de la planeación territorial, la ingeniería y la gestión ambiental, al incorporar enfoques de prospectiva científica que articulen el análisis del pasado, el diagnóstico del presente y la simulación del futuro.

LLAMADO A UNA PLANIFICACIÓN ANTICIPATORIA

La prospectiva no debe ser entendida como una adivinación, sino como una herramienta para imaginar el futuro con base en patrones verificables y datos robustos. Este estudio evidencia que la construcción de modelos predictivos rigurosos puede convertirse en un insumo indispensable para la gobernanza hídrica anticipatoria, capaz de prevenir crisis, optimizar recursos y construir escenarios sostenibles para las siguientes generaciones.

CONCLUSIONES

El modelo de regresión gamma desarrollado permite estimar con precisión el déficit hídrico en la ZMP y proporciona una base cuantitativa para orientar intervenciones estructurales. Se recomienda a CAASIM focalizar estrategias en:

- Reducción de fugas en tomas y líneas.
- Optimización del tiempo de bombeo.
- Regulación eficiente del sistema Real del Monte.
- Revisión de inversiones en infraestructura para evitar sobredimensionamiento ineficaz.

En suma, este estudio ofrece una herramienta de valor para mejorar la gobernanza hídrica local, propiciando un enfoque más preventivo, sustentable y resiliente.

El presente estudio ha demostrado que es posible estimar con alto grado de precisión la tendencia del déficit hídrico en la Zona Metropolitana de Pachuca (ZMP), mediante la construcción de un modelo de regresión gamma basado en indicadores operativos derivados de la eficiencia en el abastecimiento del agua. El modelo desarrollado explica el 72.07% de la variabilidad del déficit, lo cual valida su uso como herramienta predictiva y de apoyo a la toma de decisiones.

Entre los hallazgos más relevantes, se identificó que:

- El déficit hídrico real en la ZMP es 125 veces mayor que el déficit esperado bajo condiciones óptimas.
- Las horas de bombeo (HOB) y la infraestructura sin planeación adecuada (IFP) son factores que aumentan significativamente el déficit.
- Por el contrario, una mayor eficiencia en la distribución y comercialización del agua (DCA) reduce el déficit en casi 300 mil litros por día, mostrando ser el indicador de mayor impacto positivo.
- El sistema hidráulico de Real del Monte (SOHSR) es una zona crítica cuya operación incrementa el déficit en más de 120 mil litros diarios, lo que requiere atención inmediata.

A nivel local, los municipios con mayor afectación son Pachuca de Soto, Mineral de la Reforma y Zempoala, donde se concentran los problemas de pérdida por fugas y fallas en la infraestructura de distribución. A nivel regional, la sobreexplotación del acuífero Cuautitlán-Pachuca compromete la sustentabilidad del recurso, generando conflictos intermunicipales y limitando la capacidad de atracción de inversiones industriales y turísticas.

El incremento en horas de bombeo (HOB) detectado por el modelo refleja una estrategia reactiva por parte del organismo operador, que busca cubrir la demanda sin atender las pérdidas en el sistema. Esta práctica no solo incrementa los costos energéticos, sino que agrava el déficit al no garantizar que el agua extraída llegue efectivamente a los usuarios finales.

Asimismo, la expansión de infraestructura sin planeación estratégica ha derivado en redes sobredimensionadas y poco eficientes, lo que genera una distribución desigual del servicio: mientras algunas colonias tienen abasto continuo, otras reciben agua por tandeo, aumentando la inequidad social y el malestar comunitario.

Estos resultados evidencian que el déficit hídrico no solo es producto de la escasez natural del recurso, sino también de ineficiencias estructurales y operativas. Por tanto, mejorar la eficiencia técnica y financiera del organismo operador (CAASIM) debe ser una prioridad para avanzar hacia una gestión hídrica sostenible, resiliente y equitativa.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos, se proponen las siguientes líneas de acción estratégicas para mitigar el déficit hídrico y mejorar la eficiencia del sistema de abastecimiento en la ZMP:

• A. Nivel local (municipios y CAASIM):

- Fortalecer macromedición y micromedición.
- Auditorías técnicas en zonas críticas como el sistema Real del Monte.
- Programas de reducción de fugas con metas cuantificables.
- Educación y cultura del agua para usuarios.

B. Nivel regional (Estado de Hidalgo y zona centro del país):

- Creación de un consejo metropolitano para la gestión hídrica.
- Coordinación intermunicipal para la inversión en infraestructura.
- Políticas tarifarias progresivas y equitativas.
- Integración con planes de adaptación al cambio climático.

De forma específica, se expone un cuadro resumen (Cuadro 3), con los problemas, impactos y soluciones propuestas:

Cuadro 3
problemas, impactos y soluciones propuestas

Problema identificado	Impacto actual	Propuesta de acción	Nivel
Fugas en tomas y líneas	Pérdida del 40% del agua extraída	Programa integral de reparación	Local
Horas de bombeo excesivas	Altos costos y mayor déficit	Optimización con telemetría	Local
Infraestructura sobredimensionada	Inequidad en distribución	Planeación con análisis costo-beneficio	Regional
Sobreexplotación del acuífero	Riesgo de colapso hídrico	Consejo metropolitano de gestión hídrica	Regional

Fuente. Elaboración propia.

REFERENCIAS

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). *Estadísticas del agua en México 2022*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado el 6 de mayo de 2025 de: <https://tinyurl.com/yc4n8zmv>

FAO. (2021). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point*. Roma, Italia. Recuperado el 6 de mayo de 2025 de: <https://tinyurl.com/4wxtr68d>

Gleick, P. H. (2020). *The World's Water: The Biennial Report on Freshwater Resources* (Vol. 9). Island Press, Washington D.C., EE. UU.

González-Ramírez, J., Hernández-Luna, G., & Rivera-Martínez, M. (2022). Modelos de gestión de recursos hídricos urbanos: desafíos y propuestas para la sostenibilidad en México. *Revista Mexicana de Ciencias Ambientales*, 13(1), 45–62.
DOI: 10.1016/j.rmca.2022.01.004

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2023). *Diagnóstico de la situación hídrica nacional: retos y propuestas hacia una gestión sustentable*. México: IMTA.

McCullagh, P., & Nelder, J. A. (2019). *Generalized Linear Models* (2nd ed.). CRC Press, Boca Raton, EE. UU.

ONU-Agua. (2021). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2021: Valorando el agua*. UNESCO, París, Francia. Recuperado el 6 de mayo de 2025 de: <https://tinyurl.com/yyf9scbn>

UNESCO World Water Assessment Programme (WWAP). (2022). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Las aguas subterráneas: hacer visible lo invisible*. UNESCO, París, Francia. Recuperado el 6 de mayo de 2025 de: <https://tinyurl.com/3yzrwbss>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2023). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2023*. SEMARNAT, México. Recuperado el 6 de mayo de 2025 de: <https://tinyurl.com/ywme5wby>

Sharma, S. K., Sato, T., & Yamamoto, K. (2021). Urban water crisis: Challenges and prospects for sustainable development. *Sustainability*, 13(8), 4325.

DOI: <https://doi.org/10.3390/su13084325>

Taha, H. A. (2012). *Investigación de Operaciones* (9ª ed.). Pearson Educación, México.

Wackerly, D., Mendenhall, W., & Scheaffer, R. (2008). *Estadística matemática con aplicaciones* (7ª ed.). Cengage Learning, México.

World Bank. (2020). *Reducing Non-Revenue Water in Urban Water Utilities: A Compendium of Best Practices*. The World Bank Group, Washington, EE. UU. Recuperado el 6 de mayo de 2025 de: <https://tinyurl.com/32br5ak8>