

Análisis socio-espacial de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México

Socio-spatial analysis of residential water demand in Mexico City

Arturo Ramos-Bueno¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4882-1348>

María Perevochtchikova², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9349-8570>

Heejun Chang³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5605-6500>

¹Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, arambue@gmail.com

²Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, El Colegio de México, A.C., Ciudad de México, México, mperevochtchikova@colmex.mx

³Department of Geography, Portland State University, Portland, Oregon, USA, changh@pdx.edu

Autor para correspondencia: Arturo Ramos-Bueno, arambue@gmail.com

Resumen

La gestión del agua en las ciudades se ha vuelto cada más desafiante debido al aumento de la demanda urbana de agua en un contexto de reducción de las fuentes disponibles. Estos problemas han evidenciado la necesidad de integrar el abastecimiento de agua, drenaje y saneamiento desde el paradigma de la Gestión Integrada del Agua Urbana (GIAU). Para el estudio del componente de abastecimiento es importante considerar el análisis de los determinantes de la demanda urbana de agua. En el caso de la Ciudad de México, no se cuenta con un diagnóstico certero de dichos determinantes, a pesar de que enfrenta múltiples problemas en materia hídrica. Por esta razón, el objetivo de este trabajo consiste en estimar la demanda doméstica de agua y sus determinantes en la Ciudad de México a escala de colonias para el año 2010, con base en datos oficiales medidos. Los determinantes analizados se relacionan con cuestiones socioeconómicas, densidad urbana y acceso al agua; se usaron los modelos de regresión múltiple de mínimos cuadrados (que provee resultados globales y espacialmente estacionarios), y de regresión geográficamente ajustada (que presenta coeficientes que varían de forma espacial). Los resultados señalan que el área central de la ciudad es prioritaria para implementar estrategias desde la GIAU. La estimación presentada aporta a una comprensión más profunda de la crisis de agua en la Ciudad de México desde la visión de la demanda de agua, además de ser útil para la toma de decisiones.

Palabras clave: demanda doméstica de agua, análisis espacial, gestión integrada del agua urbana, Ciudad de México, regresión geográficamente ajustada.

Abstract

Water management in cities has turned increasingly challenging, as urban water demand escalation takes place in a context of reduction of available freshwater sources. These concerns have evidenced the need to integrate water supply, drainage, and sanitation from the Integrated Urban Water Management (IUWM) paradigm. To study water supply component, it is important to consider the analysis of urban water demand determinants. In the case of Mexico City there is a lack of an accurate diagnosis for these determinants despite the fact it faces multiple water problems. Therefore, the present study aims to estimate residential water demand and its determinants in Mexico City at a neighborhood scale for the year 2010, based on official measured data. Analyzed determinants are related to socioeconomic, urban density and access to water services issues; by employing the models of Ordinary Least Squares multiple regression (providing global and spatially stationary results) and the Geographically Weighted Regression (presenting spatially varying coefficients). Results point to the central area of the city as priority to implement strategies from the IUWM. The estimation provides a deeper comprehension of water crisis in Mexico City from a water demand-side view, it is also useful for decision-making.

Keywords: Urban residential water demand, spatial analysis, integrated urban water management, Mexico City, geographically weighted regression.

Recibido: 17/12/2019

Aceptado: 24/06/2020

Introducción

Las ciudades alrededor del mundo están enfrentando retos para administrar los recursos hídricos debido a la disminución de las fuentes de agua dulce; el aumento en la frecuencia de las sequías y la ocurrencia de otros eventos hidrometeorológicos extremos, causan que el desarrollo de nuevos proyectos de abastecimiento se vuelva cada vez menos viable en términos ambientales y políticos (Baumann & Boland, 1998). Estos desafíos también se relacionan con el aumento constante de la demanda urbana de agua (Saurí, 2013), vinculada con la creciente población que habita en ciudades y que representa la mitad de la población mundial (UN, 2018). La gestión integrada del agua urbana (GIAU) emergió como un paradigma alternativo para abordar estos problemas, al unir tres componentes de los servicios hidráulicos urbanos: abastecimiento, drenaje y saneamiento. La GIAU pretende integrar la planeación territorial y el desarrollo económico, con el propósito de superar la fragmentación en la formulación de políticas públicas, para alcanzar metas económicas, sociales y ambientales (Bahri, 2011). Este paradigma ofrece un marco conceptual para realizar el desarrollo sustentable dentro del sector hídrico (Tiburcio & Perevochtchikova, 2012).

La GIAU es un paradigma centrado en la demanda de agua, que concibe las necesidades hídricas de forma multifacética y no sólo como una mera cuestión de cantidad, lo cual contrasta con el paradigma tradicional de gestión del agua (Mitchell, 2006). Por ello, se consideran todos los usos del agua, así como la cantidad y calidad para los usos finales (Pinkham, 1999). Estas concepciones apuntan al componente de abastecimiento de agua expuesto por la GIAU; en donde destaca la necesidad de equilibrarlo en relación con la demanda, enfocándose en la reducción de los usos y pérdidas de agua, incluyendo el agua no contabilizada en un sistema (Baumann & Boland, 1998). Los objetivos de este equilibrio son cubrir las necesidades humanas y las de los ecosistemas, además de seleccionar las opciones más eficientes para gestionar el agua (Saurí, 2013; Chang, 2017). La demanda urbana de agua ocurre en sistemas naturales y sociales, a diferentes escalas temporales y espaciales que presentan distintas dinámicas (House-Peters & Chang, 2011). Ambos sistemas deben considerarse para alcanzar la integración de los componentes dentro de la gestión del agua (Tiburcio & Perevochtchikova, 2012).

Se han identificado varios determinantes para la demanda urbana de agua a micro y macro escalas en casos de estudio en Australia, Europa y Estados Unidos (Worthington & Hoffman, 2008; March & Saurí, 2009). En contraste, aún hacen falta estudios en áreas urbanas de países en desarrollo (Saurí, 2013). En América Latina solamente se encontraron dos trabajos publicados sobre este tema: uno para la ciudad de Fortaleza, Brasil (De-Maria-André & Carvalho, 2014), y otro para la ciudad de Hermosillo, México (Ojeda, Álvarez, Ramos, & Soto, 2017).

Un determinante a macro escala del uso doméstico de agua es la densidad urbana (Chang, 2017), que ha mostrado la reducción del uso de agua a mayor densidad (Saurí, 2013). Los casos de estudio realizados en las ciudades de Austin, Phoenix, Portland y Salt Lake City, EUA, evidencian este argumento (Chang, Hossein, & Shandas, 2010; Shandas & Parandvash, 2010; Stoker *et al.*, 2019). Se ha encontrado evidencia similar para la ciudad de Auckland, Nueva Zelanda (Ghavidelfar & Shamseldin, 2017). En estas publicaciones, la densidad urbana se relaciona negativamente con el uso de agua, en tanto que la presencia de jardines y albercas tiende a incrementarlo, dado que son características típicas de las viviendas con baja densidad urbana (Domene & Saurí, 2006; Wentz & Gober, 2007; De-Maria-André & Carvalho, 2014; Kontokosta & Jain, 2015).

El ingreso y el tamaño del hogar son los determinantes socioeconómicos del uso de agua más mencionados, los cuales se relacionan típicamente de forma positiva (Arbués, García-Valiñas, & Martínez-Espiñeira, 2003; Arbués & Villanúa, 2006; Domene & Saurí, 2006; Wentz & Gober, 2007; Worthington & Hoffman, 2008; De-Maria-André & Carvalho, 2014; Kontokosta & Jain, 2015). Entre otros determinantes relevantes que se han estudiado están los habitantes con educación universitaria y el número de tomas internas de agua (Babel, Das Gupta, & Pradhan, 2007); la raza y la etnicidad, además de las regulaciones del uso de suelo (Turner & Ibes, 2011); el género y el número de baños (De-Maria-André & Carvalho, 2014; Ojeda *et al.*, 2017), y el consumo de energía (Kontokosta & Jain, 2015). Pero también es importante considerar la medición del agua, dado que reduce la demanda doméstica (Worthington & Hoffman, 2008). Se ha encontrado evidencia

de este punto en tres ciudades californianas (Tanverakul & Lee, 2015), así como en la ciudad de Hermosillo, México (Ojeda *et al.*, 2017).

En todos estos estudios se han utilizado diferentes escalas temporales y espaciales, abarcando desde el nivel de manzana urbana hasta la ciudad completa; también las series de tiempo abarcan desde las diarias hasta las anuales. Las escalas temporales y espaciales se eligen según los objetivos de las acciones requeridas, dado que los determinantes de la demanda de agua varían tanto espacial como temporalmente (Billings & Jones, 2008; Chang, 2017). La investigación espacial sobre la demanda urbana de agua se ha incrementado desde el año 2001, lo cual ha permitido comprender el rol de la localización y la adyacencia para explicar el uso del agua (House-Peters & Chang, 2011).

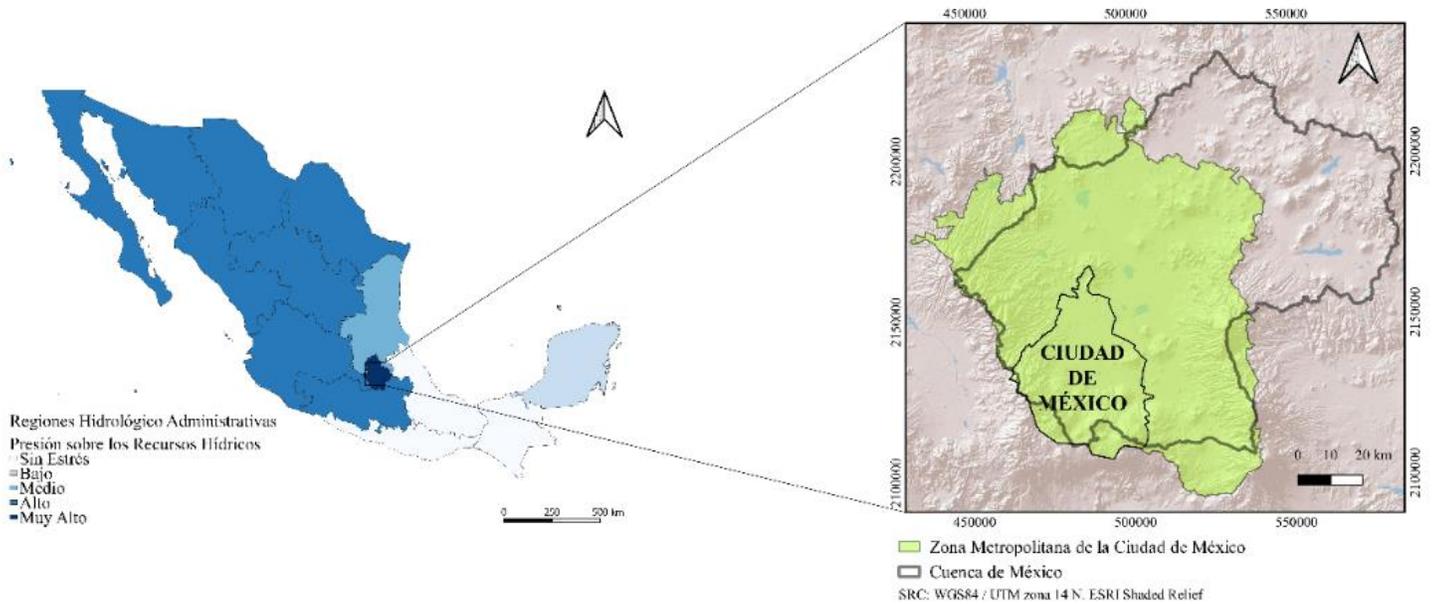
Algunos estudios han utilizado los análisis de regresión de *spatial lag* y *spatial error* en unidades censales (Chang *et al.*, 2010; House-Peters, Pratt, & Chang, 2010; Chang, Bonnette, Stoker, Crow-Miller, & Wentz, 2017; Stoker *et al.*, 2019). Estos dos análisis son espacialmente estacionarios y globales. En contraste, la regresión geográficamente ajustada (GWR) es un análisis espacialmente explícito, no estacionario y además es local, pues aborda la variación espacial de las relaciones entre variables, generando estadísticas locales para cada unidad espacial bajo estudio (Fotheringham, Brunson, & Charlton, 2002). La GWR se ha empleado para estimar coeficientes locales, asociando el consumo de agua con diferentes variables de las viviendas unifamiliares, en unidades censales en Phoenix, EUA (Wentz & Gober, 2007). Este análisis también se ha utilizado para relación las viviendas multifamiliares y el uso de agua en la ciudad de Nueva York, EUA (Kontokosta & Jain, 2015).

Como ya se mencionó, los determinantes de la demanda urbana de agua se han estudiado poco en América Latina; tal es el caso de la Ciudad de México, una de las megaciudades de la región y la capital de México (Perevochtchikova, 2015). La relevancia de estudiar estos determinantes emerge porque se trata de una ciudad que carece de un diagnóstico preciso en este tema (GDF, 2007; GDF, 2012); a la par se ha encontrado que la demanda es un factor de presión sobre los recursos hídricos subterráneos, que amenaza la sustentabilidad de la urbe a largo plazo (Martínez, Escolero, & Perevochtchikova, 2015). En síntesis, la ciudad ha estado enfrentando múltiples retos, como infraestructura de abastecimiento vulnerable (Escolero, Kraslisch, Martínez, & Perevochtchikova, 2016); conflictos políticos y sociales (Perló & González, 2009); cortes de agua y suministro intermitente (Morales & Rodríguez, 2009), así como variable acceso al agua (Jiménez, Gutiérrez, Marañón, & González, 2011). Comprender el lado de la demanda desde la gestión del agua es el primer paso hacia el desarrollo de estrategias de conservación, aplicando los principios de la GIAU.

En este sentido, el presente estudio propone el análisis y la estimación de la demanda doméstica de agua para el año 2010 en la Ciudad de México, tomando como base la escala local, considerando determinantes socioeconómicos, de densidad urbana y del acceso al agua; y aplicando dos modelos, uno global y estacionario, y el otro local, espacialmente explícito y no estacionario. El aporte de este trabajo consiste en proponer una herramienta útil para comprender mejor la compleja crisis del agua en la Ciudad de México desde una visión de la demanda, así como para asesorar el proceso de toma de decisiones desde los principios de la GIAU.

Gestión del agua en la Ciudad de México

La Ciudad de México cuenta con 8.85 millones de habitantes y pertenece a una zona metropolitana con extensión de 7 854 km², donde residen 22 815 504 personas (INEGI, 2012). En términos de la gestión nacional del agua, este territorio forma parte de la Región Hidrológico-Administrativa (RHA) XIII "Aguas del Valle de México" (Figura 1). La RHA XIII es la que presenta mayor grado de presión sobre los recursos hídricos (141 %), al igual que tiene la disponibilidad de agua más baja del país con 144 m³ por persona. La Ciudad de México genera el 16.97 % del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, mientras que su disponibilidad *per cápita* de agua es de sólo 55 m³ (Conagua, 2018).



Infraestructura de Abastecimiento de Agua para la Ciudad de México

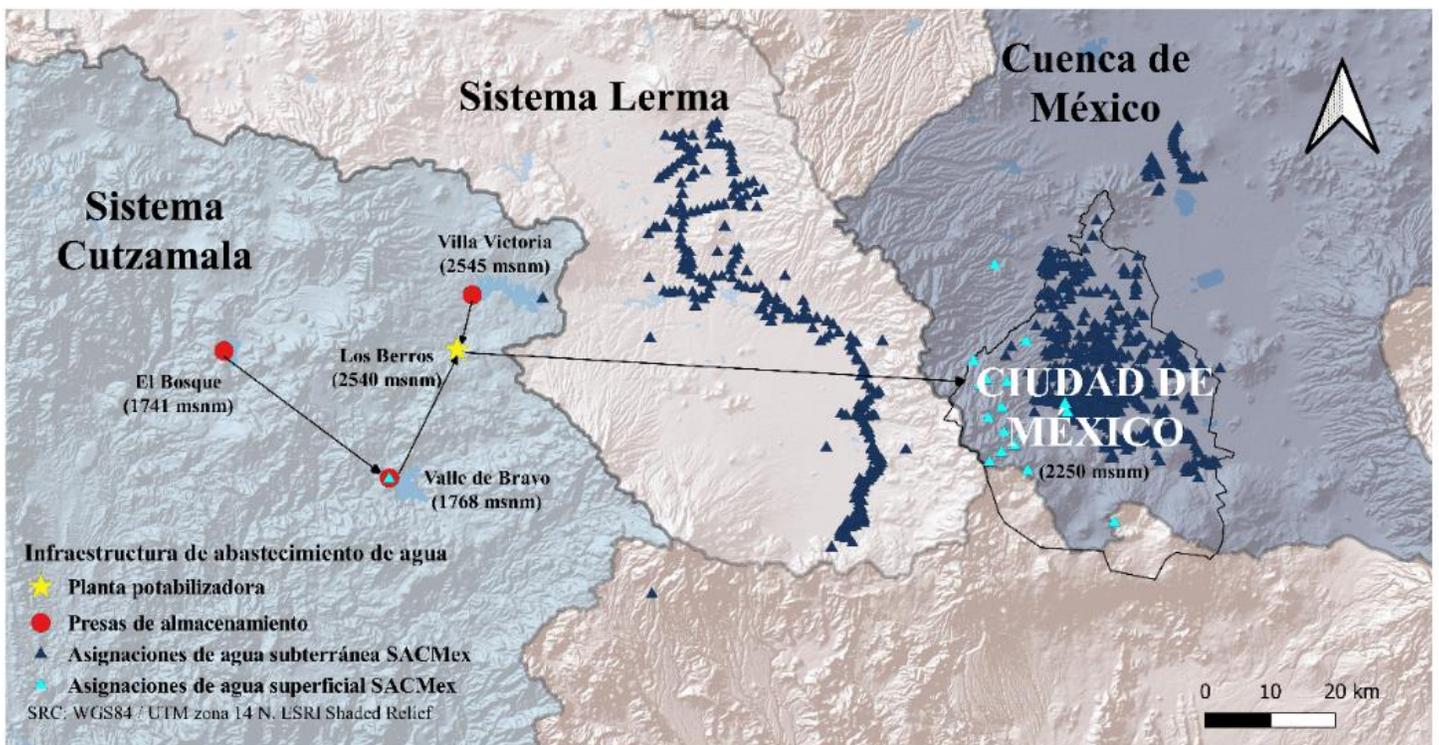


Figura 1. Localización de la Ciudad de México (Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2012); Conagua (2018), e información del sitio web de Conagua <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>).

La gestión del agua en la Ciudad de México es compleja, ya que involucra acciones de diferentes instituciones de los ámbitos nacional y local (Perevochtchikova, 2015). La Comisión Nacional del Agua (Conagua) es la institución federal encargada de otorgar permisos de concesión o asignación de volúmenes de agua para los usuarios de las aguas nacionales (Conagua, 2009); por su parte, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (Sacmex) es el organismo operador local encargado de proveer servicios hidráulicos en la Ciudad de México (ALDF, 2003). El Sacmex es un usuario de aguas nacionales bajo la regulación de la Conagua. Ambas instituciones están involucradas en el abastecimiento de agua para la ciudad, porque la infraestructura hidráulica (Figura 1) vincula artificialmente tres cuencas (Cutzamala, Lerma y la Cuenca de México). Las cifras de abastecimiento de agua para el periodo 2008-2013 muestra un valor promedio de 31.33 m³/s (Sacmex, 2014b), que se obtuvo sumando todos los aportes de las diferentes fuentes superficiales y subterráneas que son administradas tanto por la Conagua como por el Sacmex (Tabla 1). El agua subterránea extraída dentro del territorio de la Ciudad de México resulta la fuente más importante, mientras que la cantidad restante proviene de fuentes lejanas.

Tabla 1. Abastecimiento de agua de la Ciudad de México para el periodo 2008-2013. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos mediante el portal de transparencia del Sacmex (2014b) y Sacmex (2016).

Cuenca	Institución	Fuente	Ubicación	Sistema de abastecimiento	Abastecimiento promedio (m ³ /s)	Contribución (%)
Cuenca de México	Sacmex	Subterránea	Ciudad de México	Centro	1.93	6.15
				Este	2.51	8.00
				Norte	1.07	3.41
				Sur	8.02	25.61
				Poniente	0.21	0.66
				Río Magdalena	0.20	0.62
	Conagua	Subterránea	Estado de México	Manantiales	0.76	2.42
				Chiconautla	1.42	4.53
				Chalmita	2.01	6.42
Cutzamala	Conagua	Superficial	Cutzamala	La Caldera	0.52	1.66
				Cutzamala	8.60	27.43
Lerma	Sacmex	Subterránea	Lerma	Lerma	4.10	13.08

Los sistemas Lerma y Cutzamala se construyeron durante el siglo XX para cubrir las necesidades hídricas de la creciente población de la Ciudad de México, así como para disminuir la subsidencia del suelo en la Cuenca de México, causada por la extracción de agua subterránea (Perló & González, 2009). Esta situación representa la mirada desde la gestión tradicional del agua, donde las decisiones se tomaron concibiendo la

demanda de agua en relación directa con el crecimiento poblacional y el número de personas por abastecer (Tiburcio & Perevochtchikova, 2012), que pasó de 0.37 millones de personas en 1900 a 8.85 millones en 2010 (GDF, 2012; INEGI, 2012). Cabe mencionar que todos los sistemas de abastecimiento de agua de la ciudad operan bajo grandes restricciones, siendo el Sistema Cutzamala la fuente más vulnerable (Escolero *et al.*, 2016), en tanto que la extracción de agua subterránea está causando una severa disminución de los niveles piezométricos en la Cuenca de México (Martínez *et al.*, 2015).

Además de este problema, Morales y Rodríguez (2009), con base en las *Estadísticas del Agua en México* de la Conagua de 2004, mencionan la existencia de un déficit de agua de 10.24 m³/s, calculado por la diferencia entre la disponibilidad natural de agua y el caudal concesionado, lo que conlleva al suministro intermitente en algunas partes de la ciudad. En paralelo, según Jiménez *et al.* (2011), el acceso al agua en la Ciudad de México no se distribuye de modo uniforme. Estos autores definen el mejor nivel de acceso al agua como una toma interna que funciona las 24 horas del día con agua de calidad suficiente para su consumo. Las pérdidas de agua son otro problema relevante, dado que cerca del 40 % del abasto para la ciudad se pierde en fugas (Perló & González, 2009; GDF, 2012; Sacmex, 2019).

Desde 1994, el gobierno local se enfocó en incrementar la cobertura de micromedición de la demanda de agua (Martínez, 2004), sin embargo este objetivo no se ha alcanzado en su totalidad. La cobertura de micromedición promedio para el periodo 2008-2013 fue de 63 % para los usuarios domésticos, 70 % para los usuarios no domésticos y 82 % para los usuarios mixtos (Sacmex, 2014a). El término usuario hace referencia

a la persona física o moral que contrata los servicios del Sacmex, según la legislación local (ALDF, 2003). De acuerdo con los datos censales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se reportaron 2.4 millones de viviendas con una toma interna de agua, mientras que el Sacmex contabilizó dos millones de usuarios domésticos, de los cuales 1.29 contaban con medidor de agua (GDF, 2012: 35). Para el año 2010, 64.25 % de los usuarios domésticos tenía medidor, generando 9.95 m³/s de demanda doméstica de agua (Sacmex, 2014a). La Figura 2 muestra una comparación entre el abastecimiento de agua y los usos medidos para el periodo 2008-2013.

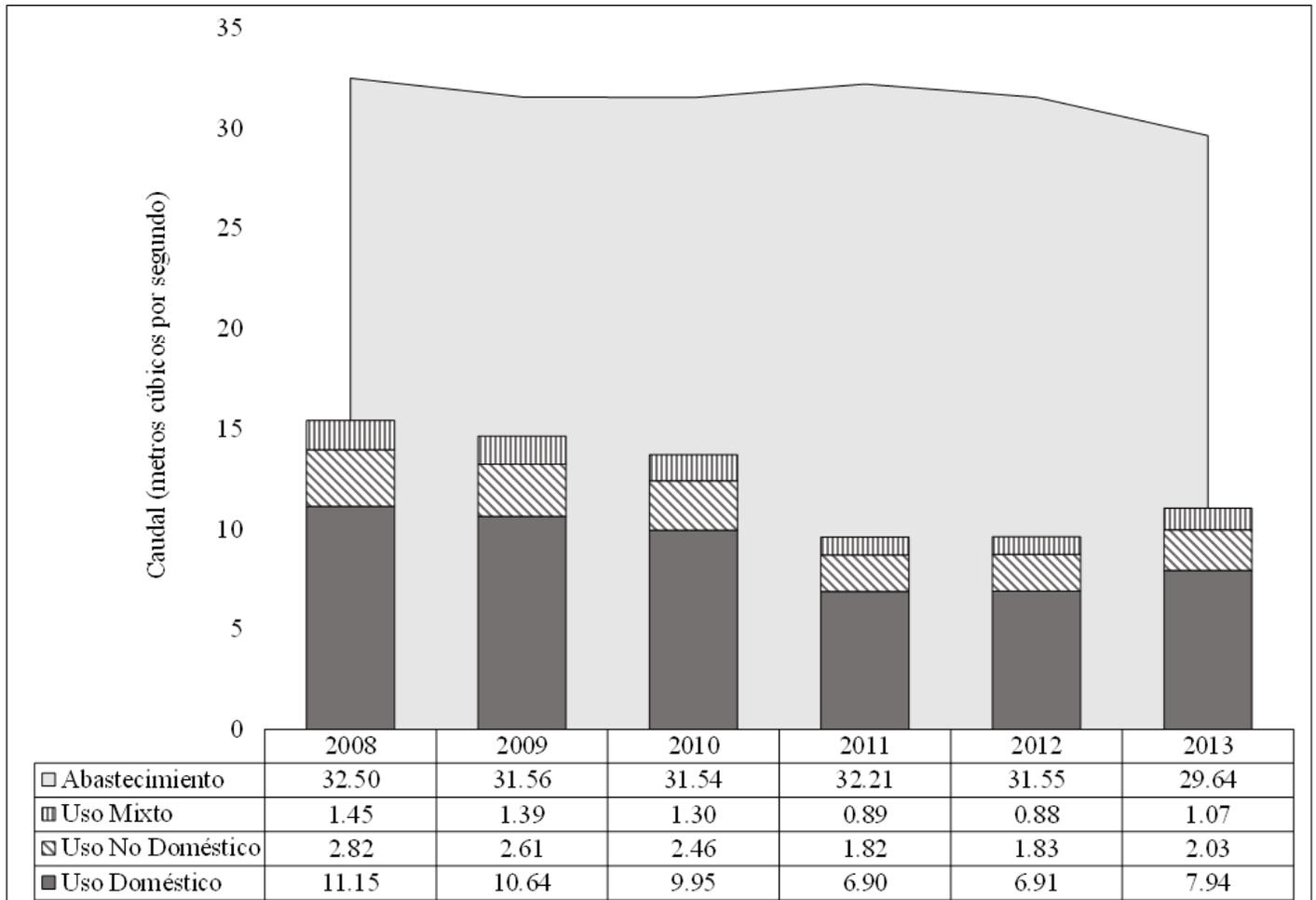


Figura 2. Usos del agua y abastecimiento en la Ciudad de México, 2008-2013. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos mediante el portal de transparencia del Sacmex (2014a) y Sacmex (2014b).

A pesar de la inclusión los principios de la GIAU como guía para el Sacmex, los programas del gobierno local se enfocan principalmente en estrategias relacionadas con el desarrollo de infraestructura hidráulica (ALDF, 2003; GDF, 2012). En particular, la demanda de agua se considera como una cuestión vinculada con el crecimiento poblacional, y ningún otro

determinante o diagnóstico se presenta al respecto (GDF, 2012). En contraste, la población de la ciudad ha mostrado una tendencia de estabilización y se proyecta su decremento hacia 2030 (Downs, Mazari-Hiriart, Domínguez-Mora, & Suffet, 2000; Perló & González, 2009; Conagua, 2018). Este punto destaca la relevancia de abordar los determinantes de la demanda de agua más allá del crecimiento poblacional, para comprender de forma más amplia la demanda doméstica de agua.

La demanda de agua en la Ciudad de México se ha estudiado muy poco en comparación con otros temas de la gestión del agua. Downs *et al.* (2000) proyectaron la demanda de agua para toda la Zona Metropolitana de la Ciudad de México hacia 2015, tomando como base un modelo probabilístico del crecimiento poblacional, extrapolarlo ciertas características socioeconómicas de una delegación de la ciudad (alcaldías actualmente). Se obtuvo como resultado para la Ciudad de México una demanda de 26 m³/s, que es similar a la estimación de 22.3 m³/s reportada por el Sacmex en GDF (2007:13). Además, el uso *per cápita* de agua se correlaciona de forma positiva con variables socioeconómicas y negativamente con el tamaño del hogar (Montesillo, 2004; Dávila & Constantino, 2007). Estos estudios se realizaron a nivel municipal y de alcaldía, que contienen gran heterogeneidad espacial; por otra parte, tampoco se menciona el uso de datos de micromedición. En contraste, Ramos-Bueno (2016) utilizó datos de micromedición para el uso doméstico de agua por colonia. Sin embargo, este estudio presenta limitaciones, pues no incluyó el suministro intermitente, a la vez que sólo se utilizaron técnicas espacialmente estacionarias.

Datos y métodos

La demanda de agua se define como “el volumen total de agua necesario o requerido para abastecer a los usuarios dentro de un cierto periodo de tiempo” (Billings & Jones, 2008: 4). En este contexto, existen estudios empíricos que se refieren tanto a la demanda doméstica de agua (Downs *et al.*, 2000; Arbués & Villanúa, 2006; Babel *et al.*, 2007; Wentz & Gober, 2007; Shandas & Parandvash, 2010; Turner & Ibes, 2011; De-Maria-André & Carvalho, 2014; Ashoori, Dzombak, & Small, 2016; Ghavidelfar & Shamseldin, 2017); así como al consumo de agua (Domene & Saurí, 2006; Chang *et al.*, 2010; House-Peters *et al.*, 2010; Ojeda *et al.*, 2017); o al uso de agua (Kontokosta & Jain, 2015; Chang *et al.*, 2017), utilizando los términos indistintamente. En el presente estudio se utiliza el término demanda doméstica de agua, que corresponde al uso doméstico medido durante el año 2010.

Análisis estadístico

Se utilizaron los modelos de regresión múltiple de Mínimos Cuadrados (OLS) y la Regresión Geográficamente Ajustada (GWR) para estimar los determinantes de la demanda doméstica de agua, a nivel colonia en la Ciudad de México. Ambos modelos fueron comparados, en forma similar a los estudios de Wentz y Gober (2007) para el caso de Phoenix, EUA, y de Kontokosta y Jain (2015) para la ciudad de Nueva York, EUA. Por ello, el primer paso consistió en crear una matriz de correlaciones entre todas las variables estudiadas para revisar sus signos y magnitudes; este procedimiento se realizó para reducir los posibles problemas de multicolinealidad (Babel *et al.*, 2007; Billings & Jones, 2008; Chang *et al.*, 2010).

Después de explorar estas relaciones, se realizaron los análisis de autocorrelación espacial univariada mediante el índice de la I de Moran, para abordar la propagación de cada variable bajo estudio. Cuando este índice tiene un valor positivo muestra la existencia de clústeres espaciales, mientras que un valor negativo denota dispersión espacial; un valor de cero es un patrón espacial inexistente (Buzai & Baxendale, 2012). Para localizar los clústeres de valores altos y bajos de cada variable, se realizó el análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA) en el *software GeoDa 1.12.1.1* (<https://spatial.uchicago.edu/geoda>) (Anselin,

2005). Se seleccionó una matriz de contiguidad de *Queen* para el ajuste espacial, ya que considera a los bordes o los vértices de las unidades espaciales como vecinos (Chang *et al.*, 2017).

La regresión múltiple OLS se utilizó para estimar los coeficientes de demanda doméstica de agua, con base en un conjunto de variables independientes (Burt, Barber, & Rigby, 2009; Buzai & Baxendale, 2012). A pesar de que este análisis se ha utilizado previamente con unidades espaciales (Wentz & Gober, 2007; Chang *et al.*, 2010; House-Peters *et al.*, 2010; Chang *et al.*, 2017), sus resultados son globales y espacialmente estacionarios, además tiende a violar el supuesto de independencia de las variables, dado que los fenómenos espaciales por lo general muestran autocorrelación espacial (Fotheringham *et al.*, 2002). Para abordar este problema se hizo un análisis de autocorrelación espacial de los residuales obtenidos con el modelo de regresión múltiple OLS, calculando el índice de la I de Moran (Buzai & Baxendale, 2012). El modelo general de regresión múltiple OLS se especifica de la siguiente manera:

$$y_i = \beta_0 + \sum_k \beta_k X_k + \varepsilon \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde (y) es la variable dependiente; x corresponde a una o más variables independientes, en tanto que (ε) es el término de error. Los coeficientes (β) son las contribuciones de cada variable independiente para predecir la variable dependiente (Burt *et al.*, 2009).

Fotheringham *et al.* (2002) propusieron el modelo GWR que provee coeficientes β , errores estándar, valores de t , y R^2 para cada una de las unidades bajo estudio. De esta forma es como se explora la variación

espacial de los determinantes independientes sobre la variable dependiente, lo que significa que es un modelo local espacialmente explícito y no estacionario. La especificación general del modelo está dada por:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (\text{Ecuación 2})$$

Este modelo presenta el término (u_i, v_i) que denota las coordenadas geográficas del i -ésimo punto en el espacio, lo cual es adicional a la regresión múltiple de mínimos cuadrados (Fotheringham *et al.*, 2002). El modelo GWR se usó para estimar la demanda doméstica anual en la Ciudad de México usando el *software GWR4.0* (<https://sgsup.asu.edu/sparc/gwr4>). Se seleccionó un kernel adaptativo *bi-square* para calcular la distancia del ancho de banda del modelo para obtener los estadísticos locales. Los coeficientes de ambos modelos se estimaron utilizando una forma log-log, que permite obtener elasticidades de la demanda doméstica de agua (Agthe & Billings, 2003; Billings & Jones, 2008). Por otra parte, el modelo GWR permitió estimar las elasticidades locales de la demanda doméstica de agua tomando en cuenta su variación espacial. Todas las variables independientes se analizaron según los clústeres espaciales resultantes del análisis GWR.

Después de estimar los coeficientes de ambos modelos, se compararon mediante el Akaike Information Criterion (AIC), así como por sus valores de R^2 para examinar sus ajustes y sus capacidades explicativas (Fotheringham *et al.*, 2002; Anselin, 2005). Los resultados pronosticados por ambos análisis se compararon con los datos observados

(provenientes de los usuarios domésticos con medidor). Posteriormente, los resultados pronosticados se sumaron por separado al caudal de agua no contabilizada (calculado con los usuarios sin medidor) para generar dos estimaciones de demanda doméstica de agua para toda la ciudad.

Selección de las variables independientes

Todos los datos fueron puestos a escala de colonias como unidad espacial de análisis. Una capa *shapefile* con 1 456 colonias fue provista por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda del gobierno local (Seduvi, 2014). Se escogió el año 2010 por la disponibilidad de datos censales (INEGI, 2012). Las colonias sin uso doméstico de agua, y aquéllas con consumo cero o falta de micromedición fueron marcadas como polígonos excluidos. El área de estudio final consistió en 1 346 colonias de la Ciudad de México.

La demanda doméstica de agua anual por colonia para el año 2010 se seleccionó como variable dependiente. Se escogieron seis variables como variables explicativas (independientes) o determinantes, con base en revisión de literatura. Por ello, se incluyeron factores socioeconómicos, densidad urbana y dos características que conciernen al acceso al agua. La Tabla 2 resume los tipos de determinantes, unidades, fuentes de información y estudios internacionales previos que dieron sustento a esta selección.

Tabla 2. Determinantes de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México.

Variable independiente	Tipo de determinante	Unidades	Fuentes de información	Estudios internacionales previos
Usuarios domésticos con medidor	Variable control	Porcentaje de usuarios con medidor	Sacmex (2014)	Martínez (2004); Tanverakul y Lee (2015); Ojeda <i>et al.</i> (2017)
Índice de Desarrollo Social	Socioeconómico	IDS promedio, con valores de 0 a 1, donde uno es el óptimo	Evalúa CDMX (2016)	Arbués y Villanúa (2006); Domene y Saurí (2006); Shandas y Parandvash (2010); Turner e Ibes (2011); De-Maria-André y Carvalho (2014); Kontokosta y Jain (2015); Ashoori <i>et al.</i> (2016)
Tamaño del hogar		Personas por vivienda	INEGI (2012)	Arbués y Villanúa (2006); Domene y Saurí (2006); Wentz y Gober (2007); Turner e Ibes (2011); Kontokosta y Jain (2015)

Densidad de vivienda	Densidad urbana	Viviendas por hectárea	INEGI (2012)	Chang <i>et al.</i> (2010); Shandas y Parandvash (2010); Ghavidelfar y Shamseldin (2017); Stoker <i>et al.</i> (2019)
Viviendas con conexión interna de agua	Acceso al agua	Total de viviendas con conexión interna de agua	INEGI (2012)	Babel <i>et al.</i> (2007)
Suministro intermitente (tandeo)		Variable categórica 1 cuando está presente; 0 ausente	Gaceta Oficial CDMX, GDF (2010)	Jiménez <i>et al.</i> (2011)

Los usuarios con medidor se seleccionaron como variable control independiente, dado que existen altos volúmenes de agua no contabilizada. El total de viviendas con toma interna de agua se consideró como una variable de acceso al agua, que caracteriza al 88.14 % de las viviendas en la ciudad (Jiménez *et al.*, 2011). Estas dos variables son relevantes para contrastar, en términos de las diferencias que hay entre las cifras del Sacmex y del INEGI en este tema (GDF, 2012).

Tomando en cuenta otra dimensión del acceso al agua, Jiménez *et al.* (2011) mencionan que el 81.5 % de los habitantes de la ciudad cuentan con suministro diario de agua. Por ello, es importante explorar el

rol del suministro intermitente en relación con la demanda de agua. Este problema se abordó utilizando datos expuestos en la *Gaceta Oficial CDMX* de la Ciudad de México (periódico oficial del gobierno local), donde se enlistan las colonias que son suministradas de esta forma (GDF, 2010).

El tamaño del hogar es un determinante conocido de la demanda de agua; usualmente tiene un efecto de incremento. De acuerdo con Wentz y Gober (2007), citando a Mayer *et al.* (1999), es un buen *proxy* de los usos interiores de agua.

El Índice de Desarrollo Social es una medida del gobierno local, creado para garantizar la cobertura universal de los derechos humanos y localizar las acciones de política social necesarias en la ciudad. Para este caso, se utilizó como un *proxy* del ingreso. Sánchez, Boltvinik, Ruiz y Figueroa (2011) exponen el enfoque metodológico utilizado para su creación, donde seis fuentes diferentes de bienestar se sintetizaron y agruparon: (1) ingreso corriente, (2) acceso a servicios públicos, (3) posesión de propiedad, (4) nivel educativo, (5) disponibilidad de tiempo para recreación, y (6) capacidad para adquirir deuda. Este índice se mide a nivel de manzana urbana.

Finalmente, la densidad de vivienda se abordó porque a mayor densidad, la demanda de agua tiende a reducirse (March & Saurí, 2009; Saurí, 2013; Chang, 2017).

Resultados

Las estadísticas descriptivas de las variables seleccionadas aparecen en la Tabla 3; los datos se muestran transformados en la forma logarítmica.

Tabla 3. Estadísticas descriptivas en forma logarítmica de la variable dependiente y las variables independientes seleccionadas para analizar la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México, 2010.

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación Estándar
Demanda doméstica de agua anual (metros cúbicos)	2.91	15.09	11.53	1.57
Usuarios domésticos con medidor (%)	-3.06	4.61	4.07	0.89
Total de viviendas con toma interna de agua (viviendas)	2.44	10.05	6.82	1.11
Índice de Desarrollo Social promedio	-0.63	0.00	-0.21	0.12

Suministro intermitente (0 o 1)	0.00	1.00	0.10	0.29
Tamaño del hogar promedio (habitantes por vivienda)	0.76	1.68	1.29	0.13
Densidad de vivienda (viviendas por ha)	-1.52	4.92	3.54	0.74

Matriz de correlaciones y distribución espacial de las variables

La Figura 3 muestra la matriz de correlaciones de todas las variables estudiadas. Todas ellas señalan correlaciones significativas con la variable dependiente. Las viviendas con toma interna de agua (VA) y la demanda doméstica de agua (AN) están fuertemente correlacionadas y con signo positivo. Por su parte, el tamaño del hogar (TH) y el suministro intermitente (TA) exhiben signos negativos, mostrando una correlación inversa con la demanda doméstica de agua. El Índice de Desarrollo Social (ID) y el tamaño del hogar son las dos variables que cuentan con el signo de mayor magnitud en toda la matriz. Para evitar problemas de multicolinealidad, el tamaño del hogar se excluyó de los análisis de regresión múltiple OLS y GWR, quedando sólo cinco variables

independientes para estos procedimientos. Es importante notar el signo negativo de esta correlación.

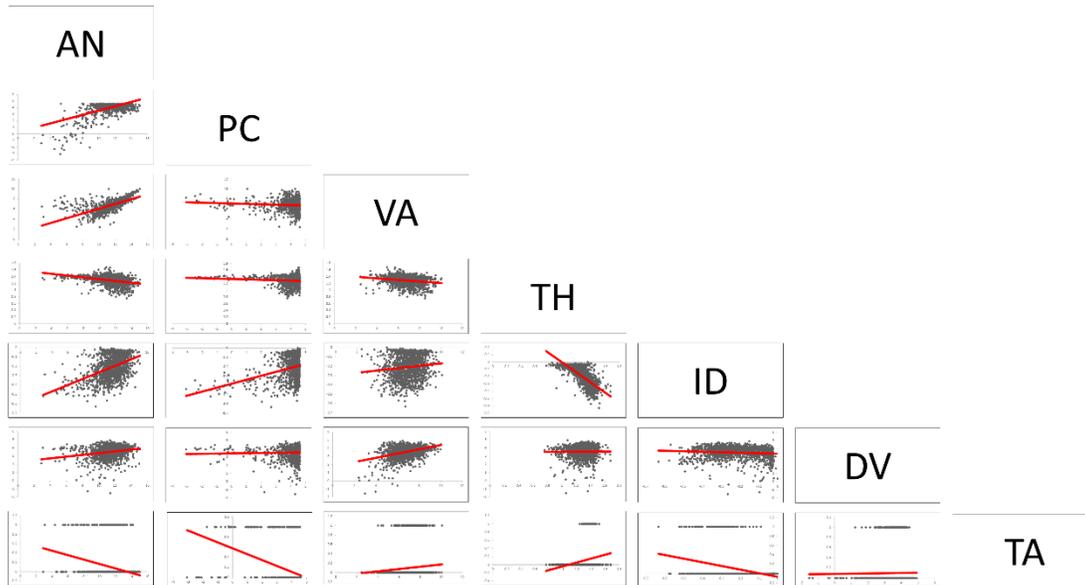
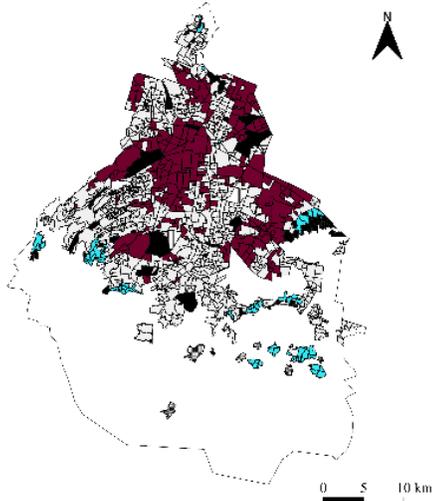


Figura 3. Matriz de correlaciones entre todas las variables bajo análisis: demanda doméstica de agua anual (AN); usuarios domésticos con medidor (PC); total de viviendas con toma interna de agua (VA); Índice de Desarrollo Social promedio (ID); suministro intermitente (TA); tamaño del hogar (TH), y densidad de vivienda (DV).

Los análisis LISA para la variable dependiente y las cinco variables de entrada restantes aparecen en la Figura 4. Los resultados para el índice de la I de Moran tuvieron valores positivos entre 0.34 y 0.65; esto indica que las variables bajo estudio presentaron patrones espaciales

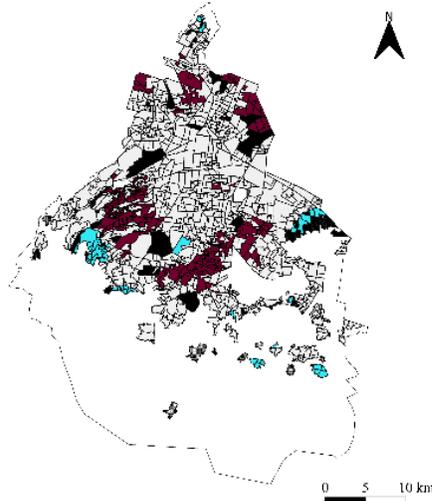
significativos en las colonias de la ciudad. En los mapas se localizan los valores altos y bajos que presentan cada una de las variables, los cuales aparecen en rojo oscuro y azul claro, respectivamente.

A) Demanda Doméstica de Agua Anual



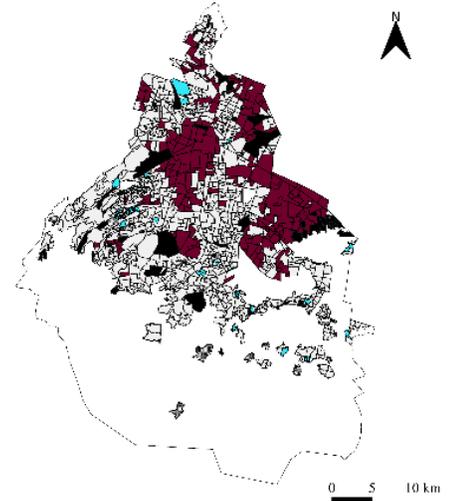
Indicadores Locales de Asociación Espacial
 No significativo
 Alto-Alto
 Bajo-Bajo
 Bajo-Alto
 Alto-Bajo
 Sin vecindad
 Polígonos excluidos

B) Usuarios Domésticos con Medidor

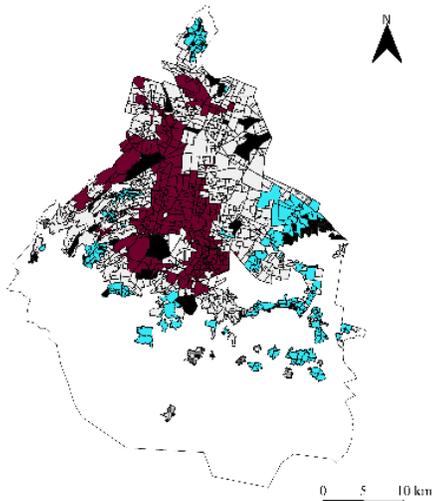


Indicadores Locales de Asociación Espacial
 No significativo
 Alto-Alto
 Bajo-Bajo
 Bajo-Alto
 Alto-Bajo
 Sin vecindad
 Polígonos excluidos

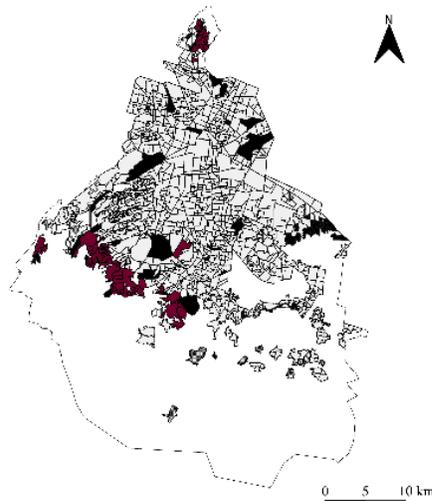
C) Viviendas con Toma Interna de Agua



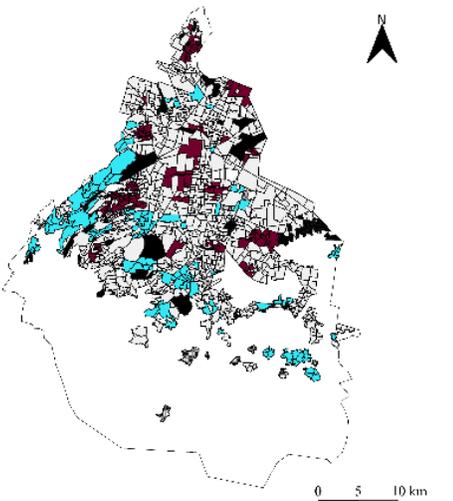
Indicadores Locales de Asociación Espacial
 No significativo
 Alto-Alto
 Bajo-Bajo
 Bajo-Alto
 Alto-Bajo
 Sin vecindad
 Polígonos excluidos



Indicadores Locales de Asociación Espacial
 No significativo
 Alto-Alto
 Bajo-Bajo
 Bajo-Alto
 Alto-Bajo
 Sin vecindad
 Polígonos excluidos



Indicadores Locales de Asociación Espacial
 No significativo
 Alto-Alto
 Bajo-Bajo
 Bajo-Alto
 Alto-Bajo
 Sin vecindad
 Polígonos excluidos



Indicadores Locales de Asociación Espacial
 No significativo
 Alto-Alto
 Bajo-Bajo
 Bajo-Alto
 Alto-Bajo
 Sin vecindad
 Polígonos excluidos

D) Índice de Desarrollo Social Promedio

E) Suministro Intermitente

F) Densidad de Vivienda

Figura 4. Indicadores Locales de Autocorrelación Espacial (LISA) de las variables dependiente e independientes para el análisis de la demanda doméstica de agua anual en las colonias de la Ciudad de México (los valores altos agrupados aparecen en rojo oscuro, mientras que los valores bajos tienen un color azul claro).

El Índice de Desarrollo Social promedio y el suministro intermitente presentaron los valores más altos para la I de Moran de 0.65 y 0.57, respectivamente (Figuras 4D y 4E). Fueron seguidos por el porcentaje de usuarios domésticos con medidor (Figura 4B), que tuvo una autocorrelación de 0.49. Las tres variables restantes tuvieron valores para la I de Moran entre 0.34 y 0.37, que son moderados, pero significativos. Las Figuras 4A y 4C muestran patrones de agrupación similares, pero difieren de la Figura 4B, mostrando diferentes patrones espaciales entre la localización de las viviendas, la cobertura de micromedición y los altos niveles de demanda doméstica de agua.

Los clústeres de valores altos de ID en la Figura 4D se localizan principalmente en el lado poniente de la ciudad, en tanto que los valores bajos aparecen en los lados sur y oriente. Algunos valores altos de demanda doméstica de agua en la Figura 4A se enciman con algunos del Índice de Desarrollo Social de la Figura 4D. En el caso de suministro intermitente, mostrado en la Figura 4E, se localiza un patrón espacial de incidencia, principalmente en la periferia surponiente de la ciudad, que corresponde con los límites montañosos de la Cuenca de México (Figura 1). Por último, la densidad de vivienda en la Figura 4F muestra un clúster

espacial de valores bajos en la zona poniente y en algunas colonias del suroriente de la ciudad.

Resultados de la regresión múltiple de mínimos cuadrados

Los resultados del análisis de regresión múltiple OLS se muestran en la Tabla 4 y corresponden a la Ecuación (1) de la sección "Selección de las variables independientes". Las cinco variables independientes (que quedaron después del procedimiento de la matriz de correlaciones): usuarios domésticos con medidor (variable control); viviendas con toma interna de agua; Índice de Desarrollo Social promedio; densidad de vivienda y suministro intermitente, resultaron estadísticamente significativas, con un intervalo de confianza del 95 % y mostraron los signos esperados.

Tabla 4. Coeficientes de regresión, errores estándar, valores de t y p del modelo de regresión múltiple de mínimos cuadrados (OLS) en forma log-log para estimar la demanda doméstica de agua en las colonias de la Ciudad de México (obtenidos de la Ecuación (1)).

Variable	Coefficiente	Error estándar	Valor de t	Valor de p
----------	--------------	----------------	--------------	--------------

Constante	1.56	0.14	10.90	0.00
Usuarios domésticos con medidor (%)	0.98	0.02	50.34	0.00
Viviendas con toma interna de agua (cuenta total)	1.00	0.02	63.06	0.00
Índice de Desarrollo Social promedio (valores de 0 a 1)	1.99	0.14	13.99	0.00
Densidad de vivienda (ha)	-0.11	0.02	-4.64	0.00
Suministro intermitente (categórica)	-0.37	0.06	-6.20	0.00
R^2	0.87			
AIC	2 338.67			
n	1 346			

El modelo explica 87 % de la demanda doméstica de agua anual en la Ciudad de México. La contribución de la variable control independiente y las viviendas con toma interna de agua es similar. Un incremento en 1 % de estas dos variables se reflejaría en aproximadamente 1 % de demanda doméstica de agua adicional. El Índice de Desarrollo Social tiene el mayor coeficiente de todas las variables, indicando que un aumento de 1 % en este índice incrementaría la demanda de agua en casi 2 %. El suministro intermitente tiene un signo negativo, lo que es esperado, pues representa una restricción del acceso al agua. La densidad de vivienda posee un coeficiente con signo negativo, que es el más bajo. Los residuales de la

regresión múltiple OLS tuvieron un valor para la I de Moran de 0.27, lo cual significa que están espacialmente autocorrelacionados.

Resultados de la regresión geográficamente ajustada

Los resultados del análisis GWR, proveniente de la Ecuación (2) de la sección “Selección de las variables independientes” se presentan en la Tabla 5. Se muestra una ligera mejoría en la R^2 en comparación con la regresión múltiple OLS. En contraste, el AIC del análisis de la GWR es menor en comparación con el de OLS, sugiriendo un mejor ajuste. Los signos y las magnitudes de los coeficientes varían según su ubicación, contrastando con los resultados de la Tabla 4.

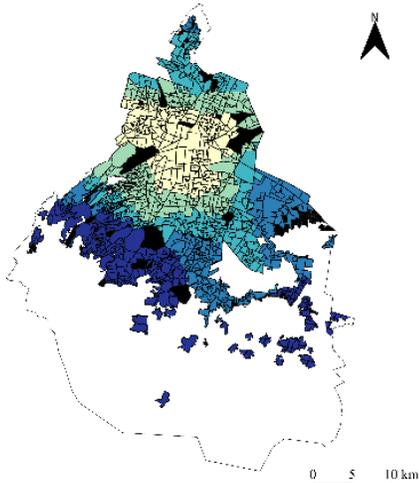
Tabla 5. Coeficientes de la regresión geográficamente ajustada (GWR), en forma log-log del modelo para estimar la demanda doméstica de agua en las colonias de la Ciudad de México (obtenidos de la Ecuación (2)).

Variable	Mínimo	Mediana	Máximo	Rango
Constante	0.25	2.42	5.11	4.86
Usuarios domésticos con medidor (%)	0.05	0.85	1.18	1.13

Viviendas con toma interna de agua (cuenta total)	0.91	0.98	1.07	0.15
Índice de Desarrollo Social promedio (valores de 0 a 1)	0.78	1.47	2.24	1.45
Densidad de vivienda (ha)	-0.35	-0.06	0.21	0.57
Suministro intermitente (categórica)	-5.49	-0.32	0.22	5.71
R^2	0.89			
AIC	2 091.96			
n	1 346			

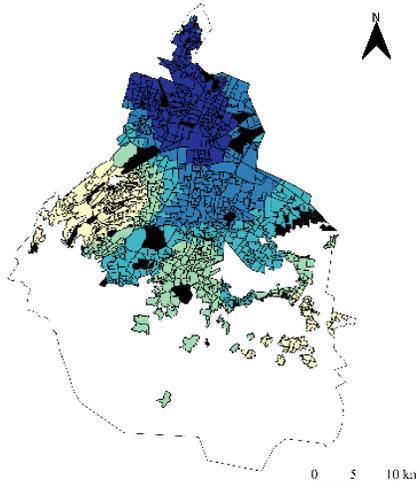
El rango de los coeficientes de la variable control va desde 0.05 hasta 1.18, mostrando mayor variación que las viviendas con toma interna de agua. La densidad de vivienda y el suministro intermitente exhiben la mayoría de sus coeficientes con signos negativos. En contraste, algunas unidades espaciales tienen signos positivos, lo cual significa que la demanda de agua incrementaría en términos de estas dos variables. Las elasticidades del Índice de Desarrollo Social varían de 0.78 a 2.24; aunque este determinante presenta uno de los mayores valores no es el caso para todas las unidades espaciales. Éstas son algunas de las diferencias relevantes que contrastan con el análisis global estacionario de la regresión múltiple OLS. Los coeficientes locales del área de estudio se muestran en la Figura 5.

A) Usuarios Domésticos con Medidor



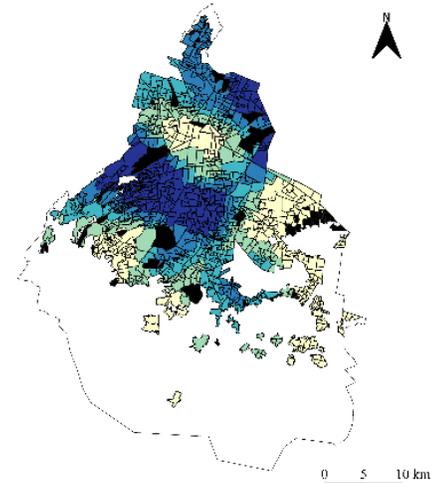
PC Coeficientes Locales
 0.051 - 0.381
 0.381 - 0.696
 0.696 - 0.936
 0.936 - 1.001
 1.001 - 1.178
 ■ Polígonos excluidos

B) Viviendas con Toma Interna de Agua

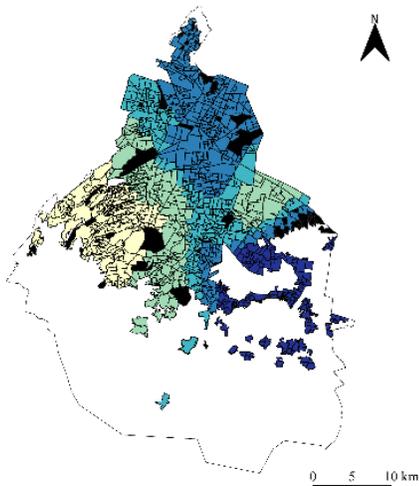


VA Coeficientes Locales
 0.912 - 0.937
 0.937 - 0.967
 0.967 - 1.003
 1.003 - 1.027
 1.027 - 1.067
 ■ Polígonos excluidos

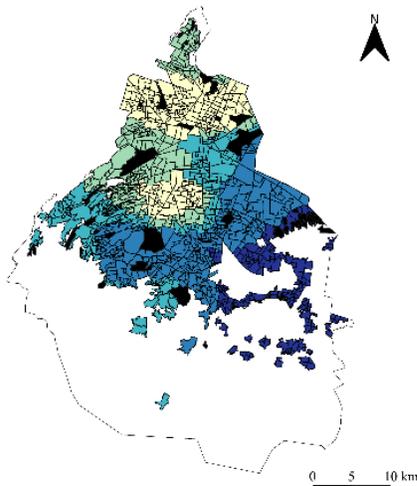
C) Índice de Desarrollo Social Promedio



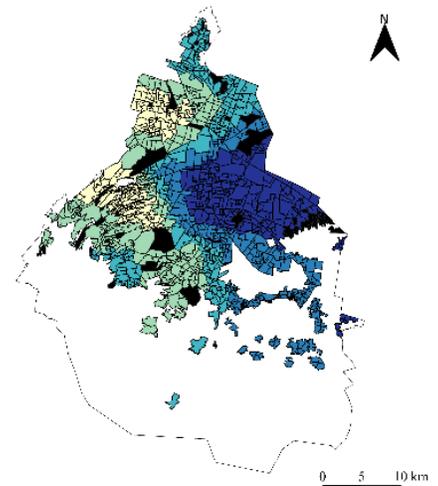
ID Coeficientes Locales
 0.784 - 1.201
 1.201 - 1.416
 1.416 - 1.541
 1.541 - 1.730
 1.730 - 2.237
 ■ Polígonos excluidos



DV Coeficientes Locales
 -0.354 - -0.249
 -0.249 - -0.087
 -0.087 - -0.038
 -0.038 - 0.000
 0.000 - 0.214
 ■ Polígonos excluidos



TA Coeficientes Locales
 -5.487 - -0.783
 -0.783 - -0.512
 -0.512 - -0.246
 -0.246 - 0.000
 0.000 - 0.221
 ■ Polígonos excluidos



Valores locales R2
 0.769 - 0.809
 0.809 - 0.847
 0.847 - 0.885
 0.885 - 0.935
 0.935 - 0.969
 ■ Polígonos excluidos

D) Densidad de Vivienda

E) Suministro Intermitente

F) Valores Locales R2

Figura 5. Distribución espacial por cuantiles de los coeficientes locales obtenidos por medio del modelo de Regresión Geográficamente Ajustada (GWR) para estimar la demanda doméstica de agua a nivel colonia de la Ciudad de México.

La Figura 5A muestra los coeficientes locales de la variable control, donde se pueden observar los valores bajos en el área central, mientras que los valores altos se localizan en el lado surponiente; esto significa que la demanda de agua es menos elástica a la micromedición en las colonias centrales, en contraste con las áreas periféricas. En el caso de las viviendas con toma interna de agua, en la Figura 5B se muestra un patrón espacial de valores de alta elasticidad en el norte, que va disminuyendo hacia el sur, a pesar de que los valores bajos se agrupan en el lado poniente; este determinante es el que exhibe el menor rango de variación espacial (Tabla 5). El Índice de Desarrollo Social en la Figura 5C muestra altos niveles de la elasticidad con la demanda doméstica de agua en la zona centro-poniente de la ciudad, mientras que los valores bajos están localizados en tres clústeres separados: uno en el área central y los otros dos en las periferias del oriente y poniente.

La densidad de vivienda en la Figura 5D muestra algunos signos positivos en las colonias de las periferias del suroriente, lo cual significa que estos determinantes incrementarían la demanda doméstica de agua en estas áreas; pese a que tales coeficientes no son muy grandes, un 10 % de incremento se traduciría en un 2 % de demanda adicional. Es importante tomar en cuenta el caso del suministro intermitente, dado que presenta la mayor variación espacial. Como este determinante representa

una restricción del acceso al agua, las áreas centrales y del norte serían las más afectadas en caso de que estas colonias tuvieran tal tipo de suministro, lo que crearía una reducción sustancial de la demanda doméstica de agua en las colonias que tienen los valores más altos para la variable dependiente.

Las características de los clústeres espaciales de la Figura 5 aparecen en la Tabla 6. Se conjuntaron los valores locales de la demanda doméstica de agua, el porcentaje promedio de usuarios domésticos con medidor, el número total de viviendas con toma interna de agua, el tamaño del hogar promedio, el Índice de Desarrollo Social promedio, la densidad de vivienda promedio y el número total de colonias con suministro intermitente, en términos de las elasticidades calculadas con el análisis GWR.

Tabla 6. Características de los grupos espaciales en términos de la distribución por cuartiles de las elasticidades. Grupos espaciales: usuarios domésticos con medidor (PC), total de viviendas con toma interna de agua (VA), Índice de Desarrollo Social promedio (ID), densidad de vivienda (DV) y suministro intermitente (TA).

Clúster Espacial	Elasticidades	Demanda de agua doméstica anual (millones de metros cúbicos)	Usuarios domésticos con medidor (%)	Viviendas con toma interna de agua (miles)	Tamaño del hogar promedio (personas por vivienda)	Índice de Desarrollo Social promedio	Densidad de vivienda (por hectárea)	Total de colonias con suministro intermitente
PC	0.051 - 0.381	87.37	64.35	565.40	3.34	0.86	49.14	0

	0.381 - 0.696	67.90	76.25	405.49	3.55	0.85	47.28	2
	0.696 - 0.936	72.12	79.27	509.01	3.71	0.82	48.50	20
	0.936 - 1.001	52.83	71.83	415.97	3.82	0.80	37.83	19
	1.001 - 1.178	33.12	58.61	275.08	3.86	0.76	29.22	87
VA	0.912 - 0.937	34.46	73.21	233.43	3.92	0.76	43.27	20
	0.937 - 0.967	46.93	68.38	298.44	3.61	0.83	31.80	44
	0.967 - 1.003	71.95	68.74	537.49	3.69	0.81	42.18	40
	1.003 - 1.027	85.95	70.88	579.09	3.53	0.85	48.92	6
	1.027 - 1.067	74.03	69.06	522.50	3.52	0.84	45.81	18
ID	0.784 - 1.201	60.16	58.87	517.49	3.87	0.75	37.58	55
	1.201 - 1.416	59.77	65.62	415.20	3.60	0.82	42.81	39
	1.416 - 1.541	56.12	74.97	367.50	3.62	0.84	38.33	7
	1.541 - 1.730	60.34	75.45	422.16	3.68	0.83	42.94	26
	1.730 - 2.237	76.94	75.42	448.60	3.49	0.85	50.34	1
DV	-0.354 - -0.249	43.77	71.26	281.34	3.77	0.80	43.54	60
	-0.249 - -0.087	75.01	71.21	501.41	3.49	0.85	43.11	31
	-0.087 - -0.038	70.71	74.56	461.16	3.51	0.86	44.32	5
	-0.038 - 0	106.51	69.56	765.01	3.58	0.83	46.77	24
	0 - 0.214	17.32	60.64	162.03	4.08	0.71	27.72	8
TA	-5.487 - -0.783	79.07	71.11	519.95	3.38	0.87	45.14	0
	-0.783 - -0.512	73.52	72.27	449.33	3.52	0.83	53.41	22
	-0.512 - -0.246	48.34	66.49	355.85	3.77	0.80	41.50	49
	-0.246 - 0	91.03	76.16	635.90	3.66	0.84	39.59	49
	0 - 0.221	21.36	59.38	209.91	4.04	0.72	29.47	8

Ciudad de México	313.33	70.06	2170.95	3.65	0.82	42.40	128
------------------	--------	-------	---------	------	------	-------	-----

Los clústeres de colonias con demanda alta de agua se caracterizan por un alto número de viviendas con toma interna de agua, tamaño del hogar pequeño, alto Índice de Desarrollo Social promedio y alta densidad de vivienda. Estas zonas también se caracterizan por un bajo número de colonias con suministro intermitente. De acuerdo con la Tabla 6, la alta cobertura de usuarios con medidor no necesariamente muestra altos niveles de demanda doméstica de agua.

Predicción y estimación de la demanda doméstica de agua

La Figura 6 muestra los valores de demanda doméstica de agua pronosticados por los dos modelos. Estos resultados son comparados con los datos observados del Sacmex; en ambos casos hay una subestimación. Se presentan dos estimaciones para la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México, basadas en los coeficientes de los análisis de regresión múltiple OLS y GWR. Las estimaciones generaron un resultado de 13.70 m³/s con los coeficientes OLS y 15.33 m³/s con los coeficientes GWR.

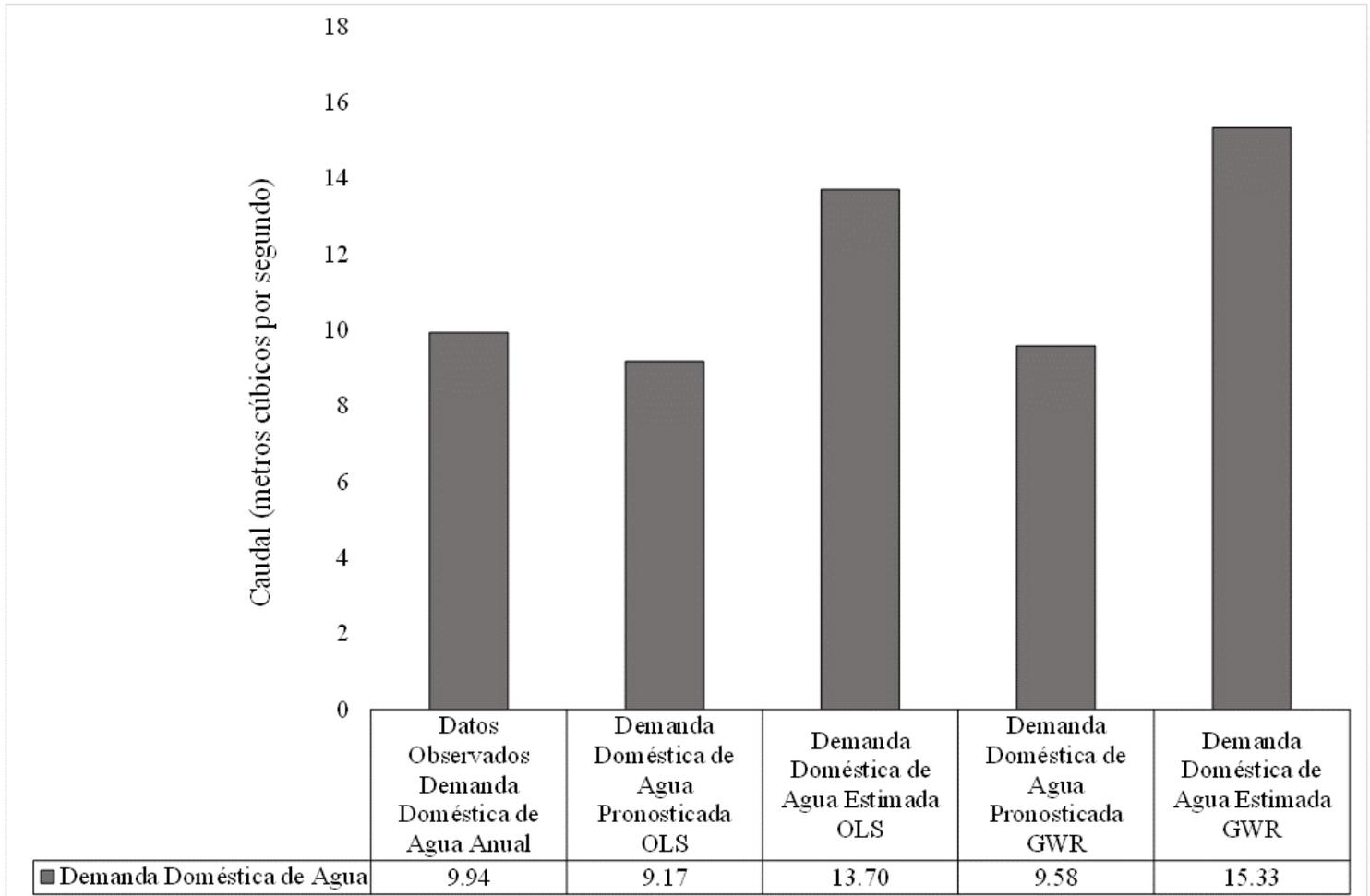


Figura 6. Demanda doméstica de agua anual observada, pronosticada y estimada con los modelos OLS y GWR en la Ciudad de México, 2010 (las columnas de la demanda doméstica de agua estimada ya incluyen los caudales no contabilizados).

La estimación de la demanda doméstica de agua con el modelo OLS representa un 43.43 % del abastecimiento total a la Ciudad de México (31.54 m³/s), en tanto que la estimación de la GWR contempla 48.59 %.

Estos resultados destacan la necesidad de abordar los caudales no contabilizados, así como las pérdidas de agua en comparación con el abastecimiento, para crear una visión en la gestión del agua desde la demanda y los principios de la GIAU e impactar en el componente de abastecimiento.

Discusión

El área central de la Ciudad de México resulta ser la principal prioridad para reducir la demanda doméstica de agua. Esta área se caracteriza por varias colonias agrupadas con altos valores de demanda doméstica de agua y bajos niveles de micromedición. Estos valores también están relacionados con muchas viviendas con toma interna de agua, indistintamente de su nivel de cobertura de micromedición. Este punto es similar a lo encontrado por Tanverakul y Lee (2015), y Ojeda *et al.* (2017), en donde los sitios sin medición tendían a utilizar más agua, en comparación con la áreas con buena cobertura de micromedición. Las áreas periféricas, a pesar de mostrar elasticidades grandes para la demanda doméstica de agua en términos de micromedición, también muestran altos niveles de suministro intermitente, que representa una restricción del acceso al agua. Este punto destaca las diferencias de demanda doméstica entre el centro y las periferias de la ciudad, aunque

los niveles de micromedición sean similares. Las acciones de gestión del agua deben tomar este punto en consideración.

La demanda doméstica de agua en la Ciudad de México está vinculada con la provisión de servicios públicos. Los niveles altos de demanda doméstica de agua se asocian con altos niveles del Índice de Desarrollo Social, tamaño pequeño del hogar y baja incidencia de suministro intermitente. Resultados similares fueron reportados por Montesillo (2004), y Dávila y Constantino (2007), en donde se correlacionaron variables socioeconómicas semejantes con el uso del agua; además, Jiménez *et al.* (2011) mencionaron que los niveles de pobreza se relacionan con mal acceso al agua. Siguiendo el patrón espacial del índice, hay agrupadas colonias con valores altos en el centro y el poniente, lo que puede relacionarse con el patrón de desarrollo urbano de la ciudad, pues las colonias del oriente son resultado de la consolidación de asentamientos irregulares que emergieron sin planeación urbana. Dado que las colonias con tamaño del hogar pequeño son las que tienen alta demanda doméstica de agua, se requiere de un estudio de intensidad de uso del agua.

Los efectos de la densidad de vivienda sobre la demanda doméstica de agua deben abordarse en un contexto amplio. Pese a que los resultados del análisis global OLS muestran a la densidad con un signo negativo, similar a Chang *et al.* (2010), Shandas y Parandvash (2010), Ghavidelfar y Shamseldin (2017), y Stoker *et al.* (2019), algunas colonias exhiben coeficientes positivos como resultado del análisis GWR (Fotheringham *et al.*, 2002). Estos coeficientes se localizan en el lado suroriente, la zona rural de la ciudad, donde la densificación crearía demanda de agua adicional. Las áreas con alta densidad son las que

también tienen altos niveles de demanda doméstica de agua y de Índice de Desarrollo Social. A pesar del posible potencial de la densidad urbana para reducir la demanda de agua, otras variables tienen efectos más fuertes.

El suministro intermitente juega un rol importante en la explicación de la demanda doméstica de agua. Como el acceso deficiente al agua es una preocupación importante en la Ciudad de México, los coeficientes locales calculados muestran que el área central y las colonias del norte serían las más afectadas en caso de enfrentar este tipo de suministro. Las colonias del lado suroriente presentan coeficientes positivos para esta variable, lo que coincide con la localización del Sistema Sur de abastecimiento. En cambio, los sistemas Norte y Central son los que proveen alrededor del 10 % del abastecimiento total de agua, donde se localizan los coeficientes altos de suministro intermitente. Este resultado sugiere una alta dependencia de las áreas centro y norte en las fuentes externas; de igual forma, sugiere su vulnerabilidad en caso de ocurrencia de este tipo de suministro, pese a los altos niveles de infraestructura que caracterizan a dichas áreas. Por esto, el déficit de agua mencionado por Morales y Rodríguez (2009), y la baja disponibilidad que refieren los programas locales de gestión (GDF, 2007; GDF, 2012), no son solamente una cuestión de cantidad. Aún es necesario comprender la causa del suministro intermitente reportado en la *Gaceta Oficial CDMX*, así como explorar los efectos de la frecuencia de suministro por hora y los problemas de calidad del agua sobre la demanda de agua doméstica.

Dado que la GIAU plantea la necesidad de abordar la demanda de agua en una forma multifacética (Mitchell, 2006), y también la búsqueda de las mejores opciones para equilibrar el abastecimiento y la demanda

(Baumann & Boland, 1998), el caso de la Ciudad de México debe centrarse en la distribución espacial de las características socioeconómicas, la densidad de vivienda y el acceso al agua en lugar de solamente en el crecimiento poblacional. Este es un punto de inflexión para concebir la gestión del agua desde una visión de la demanda.

Conclusiones

En este trabajo se expusieron un diagnóstico y dos estimaciones de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México, basándose en los modelos de regresión múltiple de Mínimos Cuadrados y GWR. Las variables socioeconómicas y el acceso al agua resultaron los determinantes más importantes de la demanda doméstica de agua, a diferencia de la densidad urbana. Con esto se destaca que la demanda de agua es más que una cuestión de cantidad; y que estos tipos de análisis sirven para la gestión del abastecimiento urbano de agua (desde principios de la GIAU), así como para la evaluación de diferentes fuentes.

Las colonias centrales de la ciudad serían de prioridad para implementar acciones de la reducción de la demanda de agua. Las estimaciones exploratorias de la demanda doméstica de agua para toda la ciudad, ofrecen comprensión en la necesidad de abordar las pérdidas del agua. Los coeficientes resultantes son útiles para apoyar a los

formuladores de política pública en las decisiones relacionadas con la gestión del agua, para enfrentar los retos actuales de la Ciudad de México en materia hídrica.

Aún se requiere más investigación sobre el acceso al agua y su relación con la demanda doméstica de agua, ya que variables como la frecuencia de suministro por hora y la calidad del agua aportarían una mayor e integral comprensión. La intensidad de uso doméstico del agua debe ser estudiada, dado que las colonias con bajo tamaño del hogar son las que consumen mayores volúmenes de agua. Otro problema relevante para examinar es el rol de las pérdidas en la explicación de la demanda de agua. Estos puntos constituyen un complemento a los resultados obtenidos en este estudio, para abarcar una visión de la GIAU desde la demanda del agua en la Ciudad de México.

Agradecimientos

Apreciamos la ayuda del Dr. Manuel Suárez Lastra y de la Dra. Leticia Gómez Mendoza en el mejoramiento de este estudio. Agradecemos el apoyo de Karla Beatrice Andrade en la revisión de estilo, y también al personal de la oficina de transparencia del Sacmex por su grato apoyo en el aporte de los datos utilizados para la presente investigación.

Referencias

Agthe, D., & Billings, R. (2003). Elasticity of demand for water resource managers. In: Agthe, D., Billings, R., & Buras, N. (eds.). *Managing*

- urban water supply* (pp. 71-86). Baton Rouge, USA: Kluwer Academic.
- ALDF, Asamblea Legislativa del Distrito Federal. (2003). *Ley de Aguas del Distrito Federal*. México, DF, México: Gobierno del Distrito Federal.
- Anselin, L. (2005). *Exploring Spatial Data with GeoDa: A Workbook*. Santa Barbara, USA: Center for Spatially Integrated Social Science.
- Arbués, F., & Villanúa, I. (2006). Potential for pricing policies in water resources management: Estimation of urban residential water demand in Zaragoza, Spain. *Urban Studies*, 43(13), 2421-2442.
- Arbués, F., García-Valiñas, M., & Martínez-Espiñeira, R. (2003). Estimation of residential water demand: A state-of-the-art review. *Journal of Socio-Economics*, 32, 81-102.
- Ashoori, N., Dzombak, D., & Small, M. (2016). Modeling the effects of conservation, demographics, price, and climate on urban water demand in Los Angeles, California. *Water Resources Management*, 30, 5247-5262.
- Babel, M., Das Gupta, A., & Pradhan, P. (2007). A multivariate econometric approach for domestic water demand modeling: An application to Kathmandu, Nepal. *Water Resource Management*, 21, 573-589.
- Bahri, A. (2011). *Hacia la gestión integrada de aguas urbanas*. Estocolmo, Suecia: Global Water Partnership.
- Baumann, D., & Boland, J. (1998). The case for managing urban water. In: Baumann, D., Boland, J., & Hanemann, W. *Urban water demand management and planning* (pp. 1-30). New York, USA: McGraw Hill.

- Billings, R., & Jones, C. (2008). *Forecasting urban water demand* (2nd ed.). Denver, USA: American Water Works Association.
- Burt, J., Barber, G., & Rigby, D. (2009). *Elementary statistics for geographers* (3rd ed.). New York, USA: Guilford.
- Buzai, G., & Baxendale, C. (2012). *Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica. Ordenamiento territorial. Temáticas de base vactorial*. Buenos Aires, Argentina: Lugar Editorial.
- Chang, H. (2017). Water conservation. In: Richardson, D. (ed.). *The international encyclopedia of geography: People, the earth, environment, and technology* (pp. 7623-7628). Chichester, West Sussex, UK: Wiley Blackwell.
- Chang, H., Bonnette, M., Stoker, P., Crow-Miller, B., & Wentz, E. (2017). Determinants of single family residential water uses across scales in four western US cities. *Science of the Total Environment*, 596/597, 451-464.
- Chang, H., Hossein, G., & Shandas, V. (2010). Spatial variation of single-family residential water consumption in Portland, Oregon. *Urban Geography*, 31(7), 953-972.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2009). *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*. México, DF, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- Dávila, H., & Constantino, R. (2007). Sistema de uso de derechos de agua potable en el Distrito Federal. En: *Economía del agua. Escasez del agua y su demanda doméstica e industrial en áreas urbanas* (pp. 149-179). México, DF, México: Cámara de Diputados, Porrúa, Universidad Autónoma Metropolitana.
- De-Maria-André, D., & Carvalho, J. (2014). Spatial determinants of urban residential water demand in Fortaleza, Brazil. *Water Resources Management*, 28, 2401-2414.
- Domene, E., & Saurí, D. (2006). Urbanisation and water consumption: Influencing factors in the metropolitan region of Barcelona. *Urban Studies*, 43, 1605-1623.
- Downs, T., Mazari-Hiriart, M., Domínguez-Mora, R., & Suffet, I. (2000). Sustainability of least cost policies for meeting Mexico City's future water demand. *Water Resources Research*, 36(8), 2321-2339.
- Escolero, O., Kraslisch, S., Martínez, S., & Perevochtchikova, M. (2016). Diagnóstico y análisis de los factores en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México. *Boletín de la Sociedad Geográfica Mexicana*, 68(3), 409-427.
- Evalúa CDMX, Consejo de Evaluación del Desarrollo Social del Distrito Federal. (March 11, 2016). *Índice de desarrollo social de las unidades territoriales del Distrito Federal/IEDS (Delegaciones-Colonias-Manzanas)*. Recuperado de <http://www.evalua.cdmx.gob.mx/medicion-unidades-territoriales-2010.php>

- Fotheringham, A., Brunson, C., & Charlton, M. (2002). *Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships*. New York, USA: Wiley.
- GDF, Gobierno del Distrito Federal. (2007). *Programa de manejo sustentable del agua para la Ciudad de México*. Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente, Secretaría de Obras y Servicios, Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- GDF, Gobierno del Distrito Federal. (May 13, 2010). Administración Pública del Distrito Federal. Secretaría de Finanzas. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, pp. 4-9.
- GDF, Gobierno del Distrito Federal. (2012). *Programa de Gestión Integral de los Recursos Hídricos, Visión 20 Años*. Ciudad de México, México: Secretaría del Medio Ambiente, Sistemas de Agua de la Ciudad de México.
- Ghavidelfar, S., & Shamseldin, A. (2017). A multi-scale analysis of single-unit housing water demand through integration of water consumption, land use and demographic data. *Water Resources Management*, 31, 2173-2186.
- House-Peters, L., & Chang, H. (2011). Urban water demand modeling: Review of concepts, method and organizing principales. *Urban Water Research*, 47, W05401. DOI: 10.1029/2010WR009624 .
- House-Peters, L., Pratt, B., & Chang, H. (2010). Effects of urban spatial structure, sociodemographics and climate on residential water consumption in Hillsboro, Oregon. *Journal of the American Water Resources Association*, 46(3), 461-472.

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2012). *Censo de Población y Vivienda 2010. Sistema para la Consulta de Información Censal (SCINCE Versión 05/12)*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/est/scince/scince2010.aspx>
- Jiménez, B., Gutiérrez, R., Marañón, B., & González, A. (2011). *Evaluación de la política de acceso al agua potable en el Distrito Federal*. México, DF, México: Evalúa DF, Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Kontokosta, C., & Jain, R. (2015). Modeling the determinants of large-scale building water use: Implications for data-driven urban sustainability policy. *Sustainable Cities and Society*, 18, 44-55.
- March, H., & Saurí, D. (2009). What lies behind domestic water use? A review essay on the drivers of domestic water consumption. *Boletín de la AGE*, 50, 297-314.
- Martínez, M. (2004). La participación de la empresa privada en la gestión de servicios de agua en el Distrito Federal. En: Libreros, H., López, R., Martínez, M., Montesillos, J., Ortiz, G., & Quiñones, A. (eds.). *Gestión del agua en el Distrito Federal. Retos y propuestas* (pp. 15-57). México, DF, México: Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez, S., Escolero, O., & Perevochtchikova, M. (2015). A comprehensive approach for the assessment of shared aquifers: The case of Mexico City. *Sustainable Water Resources Management*, 1(2), 111-123.

Mayer, P. W., De-Oreo, W. B., Opitz, E., Keifer, J., Dziegielewski, B., Davis, W., & Nelson, J. O. (1999). *Residential end uses of water*. Denver, USA: American Water Works Association.

Mitchell, G. (2006). Applying integrated urban water management concepts: A review of Australian experience. *Environmental Management*, 37(5), 589-605.

Montesillo, J. (2004). Estructura tarifaria. Análisis económico de la estructura tarifaria del servicio de agua potable en el Distrito Federal. En: *Gestión del agua en el Distrito Federal. Retos y propuestas* (pp. 101-149). México, DF: Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, Universidad Nacional Autónoma de México.

Morales, J., & Rodríguez, L. (2009). Política hídrica en la Zona Metropolitana del Valle de México y riesgos para suministrar agua al uso doméstico e industrial. En: Montero, D., Gómez, E., Carrillo, G., & Rodríguez, L. (eds.). *Innovación tecnológica, cultura y gestión del agua. Nuevos retos del agua en el Valle de México* (pp. 21-53). México, DF, México: Porrúa, Universidad Autónoma Metropolitana, Cámara de Diputados.

Ojeda, A., Álvarez, C., Ramos, M., & Soto, F. (2017). Determinants of domestic water consumption in Hermosillo, Sonora, Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1901-1910.

Perevochtchikova, M. (2015). Agua y ciudad: el abasto de agua potable en la Ciudad de México. En: Schteingart, M., & Piréz, P. (eds.). *Dos grandes metrópolis latinoamericanas: Ciudad de México y Buenos Aires. Una perspectiva comparativa* (pp. 239-260). Ciudad de México, México: El Colegio de México.

Perló, M., & González, A. (2009). *¿Guerra por el agua en el Valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México* (2a ed.). México, DF, México: Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, Universidad Nacional Autónoma de México.

Pinkham, R. (1999). *21st century water systems: Scenarios, visions, and drivers*. Recuperado de http://www.rmi.org/Knowledge-Center/Library/W99-21_21stCenturyWater

Ramos-Bueno, A. (2016). *Análisis socio-espacial de la demanda por uso doméstico de agua en la Ciudad de México* (tesis de Maestría en Geografía). Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Sacmex, Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2014a). *Portal de transparencia, solicitud de información pública 0324000022614. Consumo anual de agua, total de tomas instaladas para uso doméstico, total de tomas instaladas con medidor y nombre de colonias para el periodo 2008-2013*. Recuperado de <https://infomexdf.org.mx/InfomexDF/consulta.html>

Sacmex, Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2014b). *Portal de transparencia, solicitud de información pública 0324000105214. Volumen total de agua suministrado a la Ciudad de México, 2008-2013*. Recuperado de <https://infomexdf.org.mx/InfomexDF/consulta.html>

Sacmex, Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2016). *Portal de transparencia, solicitud de información pública 0324000111816. Volumen de agua extraído por pozos operados por el Sacmex, con*

desglose mensual 2003-2015. Recuperado de
<https://infomexdf.org.mx/InfomexDF/consulta.html>

Sacmex, Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2019). *Librería Virtual. Diagnósticos, logros y desafíos Sacmex 2018.* Recuperado de
<http://data.sacmex.cdmx.gob.mx/aplicaciones/libreria/biblioteca/libros/2018/diagnostico-logros-y-desafios-2018.pdf>

Sánchez, A., Boltvinik, J., Ruiz, F., & Figueroa, H. (2011). *Índice de desarrollo social de las unidades territoriales del Distrito Federal. Delegación, colonia y manzana.* México, DF, México: Evalúa DF, Consejo de Evaluación del Desarrollo Social del Distrito Federal.

Saurí, D. (2013). Water conservation: Theory and evidence in urban areas of the developed world. *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 227-248.

Seduvi, Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). *Portal de transparencia, solicitud de información pública 0105000279114. Colonias de la Ciudad de México.* Recuperado de
<http://devliferay.inai.org.mx:8080/web/guest/inicio>

Shandas, V., & Parandvash, G. (2010). Integrating urban form and demographics in water-demand management: An empirical case study of Portland, Oregon. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37, 112-128.

Stoker, P., Chang, H., Wentz, G., Crow-Miller, B., Jehle, G., & Bonnette, M. (2019). Building water-efficient cities. *Journal of the American Planning Association*, 85(4), 511-524.

- Tanverakul, S., & Lee, J. (2015). Impacts of metering on residential water use in California. *Journal of American Water Works Association*, 107(2), E69-E75.
- Tiburcio, A., & Perevochtchikova, M. (2012). Indicadores ambientales en la gestión del agua urbana. En: Perevochtchikova, M. (ed.). *Cultura del agua en México. Conceptualización y vulnerabilidad social* (pp. 377-399). México, DF, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Porrúa.
- Turner, V., & Ibes, D. (2011). The impact of homeowners associations on residential water demand management in Phoenix, Arizona. *Urban Geography*, 32(8), 1167-1188.
- UN, United Nations. (May 16, 2018). *Department of Economic and Social Affairs. 2018 Revision of World Urbanization Prospects*. Recuperado de <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- Wentz, E., & Gober, P. (2007). Determinants of small-area water consumption for the City of Phoenix, Arizona. *Water Resources Management*, 21, 1849-1863.
- Worthington, A., & Hoffman, M. (2008). An empirical survey of residential water demand modelling. *Journal of Economic Surveys*, 22(5), 842-871.