



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

ANÁLISIS SOCIO-ESPACIAL DE LA DEMANDA DE AGUA URBANA PARA LA
GESTIÓN INTEGRADA EN LA CIUDAD DE MÉXICO (2008-2018)

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
ARTURO RAMOS BUENO

TUTORA PRINCIPAL:
DRA. MARÍA PREVOCHTCHIKOVA
CENTRO DE ESTUDIOS DEMOGRÁFICOS URBANOS Y AMBIENTALES
EL COLEGIO DE MÉXICO

COMITÉ TUTOR
DRA. LETICIA GOMEZ MENDOZA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

DR. MANUEL SUAREZ LASTRA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico el presente trabajo a mi papá Humberto Ramos Sánchez, a mi mamá Adriana Bueno Benet, a mi hermana Adriana Ramos Bueno y a mi cuñado Edgar Sánchez Esquivel, quienes han sido testigos de mi gusto por la cartografía.

A mi sobrina Helenita Sánchez Ramos, porque su mirada curiosa se convierta en una vida llena de grandes experiencias y muchas satisfacciones.

Agradecimientos

Agradezco a la Dra. María Perevochtchikova, quien en todo momento me ha apoyado y me ha permitido desarrollar mis ideas en plena libertad, además de brindarme su amistad.

Agradezco a la Dra. Leticia Gómez Mendoza y al Dr. Manuel Suárez Lastra, quienes dieron fortaleza a la realización y concreción del presente trabajo con sus valiosos y constantes aportes.

Agradezco el apoyo de la Dra. Argelia Tiburcio Sánchez y de la Dra. Sandra Martínez por su participación en mi examen de candidatura. También, extendiendo el agradecimiento al Dr. Rafael Val Segura y al Dr. Daniel Revollo Fernández por su participación en el sínodo revisor. A todos ellos les agradezco sus aportes para mejorar mi trabajo.

Agradezco a la Dra. Linda Rosa Manzanilla Naim con quien comencé a navegar en el mundo de la investigación.

Agradezco al Mtro. Faustino de Luna Cruz del Instituto de Ingeniería, donde comencé a utilizar los Sistemas de Información Geográfica.

Agradezco a Concepción Reyes Pérez, asistente de la Dirección del Instituto de Geografía quien siempre estuvo al pendiente de mis trámites para el desarrollo de este trabajo.

Agradezco al personal del Posgrado en Geografía: Dr. José Ramón Hernández Santana, Mtro. Macario Arredondo Romero, Socorro Audiffred Guerra, Elena López García, Berenice López Zamudio, por su diligencia en el apoyo para la realización de trámites, pese a situaciones extraordinarias.

Agradezco al personal de la Unidad de Transparencia del Sistema de Aguas de la Ciudad de México a cargo de la Mtra. Berenice Cruz Martínez, por su excelente trabajo en la garantía del derecho a la información pública que fue la herramienta fundamental en el desarrollo del presente trabajo. Quiero destacar que, pese a la situación sanitaria, las solicitudes de información que realicé se concretaron en tiempo y forma.

Agradezco a toda mi familia por su compañía, apoyo y enseñanzas.

Agradezco a Karla Betrice Andrande, Isabel Quintero, Adriana Flores, Joaquín Baltazar, Pedro Arredondo, Rocío Reyes, Nalle Camacho, Diana López, Guillermo Stevez, Erick Gutiérrez y Hector Zaragoza quienes me han brindado su amistad incondicional.

Agradezco a mis colegas Arcelia Moreno, Nahum Osorio, Faustino Gómez, Angel Merló, Alejandro Uscanga y Rigoberto Santiago.

Agradezco al profesor Ulises Anel y a la profesora Adyani Gámiz quienes forma una parte importante de mi crecimiento personal y a quienes les expreso mi admiración.

Nikintlasohkamati nobalwan Ofelia Canuto Bello, Bronco Salazar, Angélica wan Roberto Domigunez akino nochipa onechpalweihkeh niwelis nawatl. Nohkia nikintlasohkamati notemachtikawan Eusebia Martínez Silva, Sergio Sevilla Peña wan Leopoldo Valiñas akino onechmachtihkeh miak tlamantli tlen inin tlahtolle ika noyohlo tlahto.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura, maestría y doctorado.

Agradezco al Conasejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca que me brindó durante cuatro años para el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradezco al proyecto 290832 "Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds (TRASSE)", ANR-CONACyT, del cual forma parte la presente tesis.

Resumen

La Gestión Integrada del Agua Urbana como paradigma emergente que aborda la crisis del agua generada por el incremento de la población que reside en ciudades y las limitaciones de las fuentes disponibles de agua, ha planteado la necesidad de comprender la demanda de agua que se requiere en las zonas urbanas, por ello se enfatiza el abordaje multifacético para el planteamiento de estrategias que se traduzcan en su gestión. Estos planteamientos corresponden a una visión desde el quehacer de los organismos operadores, que comprenden a la demanda de agua como el volumen que requieren los usuarios en un periodo de tiempo, más los componentes de agua no contabilizada y las pérdidas, por esta razón, el estudio de la demanda de agua se vincula directamente con los caudales de abasto que se requiere para las zonas urbanas. En este contexto se ha destacado el rol que juega la investigación espacial para comprender la dinámica del consumo de agua al interior de las ciudades.

El caso de la Ciudad de México se caracteriza por ser una ciudad que enfrenta diferentes retos asociados a la gestión del agua, entre ellos se pueden nombrar su dependencia en fuentes externas que componen un sistema regional de abastecimiento, la subsidencia del suelo debida a la extracción de agua subterránea y un acceso diferencial al agua entre la población. Dentro de todos estos temas, se ha abordado escasamente el tema de la demanda de agua y sus determinantes, ya que, se vincula directamente con el crecimiento poblacional que ha estado mostrando una tendencia a la estabilización; por otra parte, se carece de una cobertura universal de micromedición que permita saber cuánta agua se utiliza en la ciudad. El objetivo de la presente investigación se centra en generar un diagnóstico multifacético, integrado y espacial de los determinantes de la demanda de agua que generan los usos doméstico, mixto y no doméstico en la Ciudad de México.

Para ello, se utilizó información pública generada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, que se georreferenció en las colonias y las alcaldías de la ciudad como unidades espaciales de análisis. Se contempló el periodo de 2008 a 2018 para contar con una visión de mediano plazo. Entre los insumos generados, se encuentra una estimación de la demanda de agua generada a partir del estudio de los determinantes de su componente medido que permitieron abordar la cantidad de agua no contabilizada. Estos resultados fueron útiles para comprar con el abastecimiento total desde una visión local que se vincula con el

sistema de abastecimiento regional del cual depende la ciudad. A partir de la visión espacial, fue posible conocer los requerimientos de agua de cada una de las 16 alcaldías, además de comprender su comportamiento estacional. También se abordó a nivel colonia, los determinantes de la demanda de agua en relación con variables que caracterizan el ambiente urbano construido, el acceso al agua, así como determinantes socioeconómicos.

El estudio espacial de la demanda urbana de agua permite distinguir los diferentes retos que enfrentan las distintas zonas que conforman la Ciudad de México. Este diagnóstico es un primer paso hacia la generación de estrategias que conciernen a la gestión de la demanda de agua, con la finalidad de implementar los principios que plantea la Gestión Integrada del Agua Urbana en el caso de la capital mexicana.

Summary

Integrated Urban Water Management as an emergent paradigm focusing on water crisis caused by increasing population living in cities, as well as limitations of available sources, have raised the need to understand water demand requirements in urban areas from a multifaceted approach to proposing strategies for its management. These ideas come from a water utility vision, that defines water demand as a volume required by users in a certain period including two additional components unaccounted water and losses, for this reason, water demand studies are directly linked to necessary supply for urban areas. In this context, the role of spatial research has been distinguished in understanding consumption dynamics inside cities.

The case of Mexico City is characterized by many challenges related to water management, some of them are dependency on external sources conforming a regional supply system, land subsidence due to groundwater withdrawal and differential access to water services among population. In turn, water demand and its determinants have been lightly approached, as demand is conceived as a consequence of population growth despite its stabilizing trend. In addition, there is a lack of universal metered water coverage enabling to count water requirements for the city. This research aims in generating a multifaceted, integrated, and spatial diagnosis of urban water demand determinants concerning residential, mixed, and nonresidential water uses in Mexico City.

This diagnosis is based on public information generated by local water utility *Sistema de Aguas de la Ciudad de México*, which provided data that was georeferenced in spatial units corresponding to districts (*alcaldías*) and neighborhoods. The study period represents a 10-year medium term vision contemplating 2008 to 2018. Some of the results are an estimation of urban water demand based on determinants of its metered component that allowed calculating unaccounted water. This estimation was compared to the total water supply representing a link between a local view and the regional system the city is dependent on. From the spatial vision, it was possible to count water requirements for each of the 16 districts (*alcaldías*), as well as understanding urban water demand seasonality. On a neighborhood level, urban water demand was related to determinants such as a characterization of built environment, access to water services, and socioeconomic variables.

Studying urban water demand spatially allowed to distinguish the location of challenges in different areas of Mexico City. This diagnosis is a first step to generate strategies related to demand management, to implement Integrated Urban Water Management principals in the case of the Mexican capital.

Contenido

Agradecimientos	2
Resumen	4
Summary	6
Introducción	19
Capítulo 1. Análisis socio-espacial de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México.....	32
Introducción	34
Gestión del agua en la Ciudad de México	37
Datos y métodos.....	42
Análisis estadístico.....	42
Selección de las variables independientes.....	45
Resultados	47
Matriz de correlaciones y distribución espacial de las variables	48
Resultados de la regresión múltiple de mínimos cuadrados	49
Resultados de la regresión geográficamente ajustada	52
Predicción y estimación de la demanda doméstica de agua.....	56
Discusión	57
Conclusiones	59
Referencias.....	60
Capítulo 2. Análisis Espacial y Estimación de la Demanda Urbana de Agua en la Ciudad de México	67
1.- Introducción.....	68
2.- Usos del agua en la Ciudad de México	72
3.- Metodología.....	78
4.- Resultados.....	82
4.1 Análisis Locales de Indicadores de Asociación Espacial para la demanda urbana de agua en las colonias de la Ciudad de México.....	82
4.2 Análisis multivariado del componente medido de la DUA en relación con el ambiente urbano construido	84

4.3 Estimación de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México	88
5.- Comentarios finales	91
Referencias.....	93
Anexo 1	100
Anexo 2.....	101
Capítulo 3. Análisis estacional y espacial de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México (2008-2018).....	102
Introducción	102
Metodología	106
Resultados	111
Discusión	126
Conclusiones	129
Referencias.....	129
Anexo	135
Capítulo 4. Extracción y demanda urbana de agua a nivel de alcaldía en la Ciudad de México para el periodo 2008-2018	142
Introducción	142
Balance entre el abastecimiento y la demanda urbana de agua estimada en la Ciudad de México	145
Situación de la demanda urbana de agua con respecto a los sistemas de abastecimiento externos	157
Aporte del Suelo de Conservación y uso local del agua al interior de la Ciudad de México	164
Comentarios Finales	168
Referencias.....	170
Conclusiones generales.....	175
Nota complementaria 1. Sobre el uso del concepto de demanda urbana de agua	183
Demanda urbana de agua	183
Análisis de la demanda urbana de agua según el esquema tarifario	186
Resultados	188
Comentarios finales	196
Referencias.....	198

Nota complementaria 2. Sobre los ajustes de los modelos estadísticos presentados en los capítulos 1 y 2	208
Precisiones sobre los análisis del “Capítulo 1. Análisis socio-espacial de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México”	208
Precisiones sobre los análisis del “Capítulo 2. Análisis Espacial y Estimación de la Demanda Urbana de Agua en la Ciudad de México”	213

Índice de Figuras

Capítulo 1. Análisis socio-espacial de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México

Figura 1 Localización de la Ciudad de México.....	38
Figura 2 Usos del agua y abastecimiento en la Ciudad de México, 2008-2013.....	41
Figura 3 Matriz de correlaciones entre todas las variables bajo análisis.....	48
Figura 4 Indicadores Locales de Asociación 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.....	50
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.....	54
Figura 6 Demanda doméstica de agua anual observada, pronosticada y estimada con los modelos OLS y GWR en la Ciudad de México, 2010.	56

Capítulo 2. Análisis Espacial y Estimación de la Demanda Urbana de Agua en la Ciudad de México

Figura 1 Usuarios del agua en la Ciudad de México, 2010.....	75
Figura 2 Alcaldías que componen las Unidades Territoriales del PGDUDF.....	78
Figura 3 Análisis Local de Asociación Espacial para las distribuciones espaciales de los tres usos de agua en la Ciudad de México.....	85
Figura 4 Estimación de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México, en comparación con el caudal abastecido.	89
Figura 5 Intensidad de los tres usos del agua que componen la DUA (litros/usuario/día) en las unidades territoriales del PGDUDF (GDF, 2003).	90

Capítulo 3. Análisis estacional y espacial de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México (2008-2018)

Figura 1 Análisis Local de Asociación Espacial (LISA) para los coeficientes del uso doméstico bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México.	119
Figura 2 Análisis Local de Asociación Espacial (LISA) para los coeficientes del uso mixto (arriba) y el uso no doméstico (abajo) bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México.	120
Figura 3 Comparación global de la demanda urbana estimada con los datos expuestos en SACMEX (2019a:62).	123
Figura 4 Análisis espacial de la intensidad del uso doméstico, mixto y no doméstico del agua en las alcaldías de la Ciudad de México.	125
Figura 5 Comparación de datos medidos bimestrales y datos predichos para el uso doméstico en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	137
Figura 6 Comparación de datos medidos bimestrales y datos predichos para el uso mixto en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	138
Figura 7 Comparación de datos medidos bimestrales y datos predichos para el uso no doméstico en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	139

Capítulo 4. Extracción y demanda urbana de agua a nivel de alcaldía en la Ciudad de México para el periodo 2008-2018

Figura 1 Sistema Regional de Abasto de Agua para la Ciudad de México.	147
Figura 2 Ubicación de los Sistemas de Abasto de Agua para la Ciudad de México.	149
Figura 3 Análisis de la extracción de agua subterránea y superficial, demanda urbana de agua, balance extracción-demanda e intensidad de uso de agua.	154
Figura 4 Áreas continuas de abasto externo en función de los sistemas externos que abastecen a las alcaldías de la Ciudad de México.	159
Figura 5 Distribución espacial de la extracción, demanda urbana de agua, balance extracción-demanda e intensidad de uso del agua según las áreas continuas de los sistemas externos (2008-2018).	160

Figura 6 Ubicación del Suelo de Conservación de la CDMX en comparación del balance extracción-recarga y de los aprovechamientos asignados al SACMEX.....	165
--	-----

Nota complementaria 1. Sobre el uso del concepto de demanda urbana de agua

Figura 1 Residuales estándar del modelo de regresión lineal múltiple (OLS) que explica el uso doméstico de agua en las colonias de la Ciudad de México. Año 2010.	190
Figura 2 Residuales estándar del modelo de regresión lineal múltiple (OLS) que explica el uso mixto de agua en las colonias de la Ciudad de México. Año 2010.	192
Figura 3 Residuales estándar del modelo de regresión lineal múltiple (OLS) que explica el uso mixto de agua en las colonias de la Ciudad de México. Año 2010.	195
Figura 4 Consumo de agua medido y consumo predicho por los modelos de regresión lineal múltiple para la Ciudad de México, 2010.....	196

Nota complementaria 2. Sobre los ajustes de los modelos estadísticos presentados en los capítulos 1 y 2

Figura 1 Residuales estándar, obtenidos a partir de la estimación de los modelos de regresión OLS y GWR para explicar la demanda doméstica de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.	212
Figura 2 Residuales estándar de los modelos de regresión lineal múltiple utilizados para estimar los usos doméstico, mixto y no doméstico de agua en la Ciudad de México. Año 2010.	215
Figura 3 Mapa de referencia, para consulta de los nombres de las alcaldías de la CDMX que se mencionan en los capítulos 3 y 4.	216

Índice de Tablas

Capítulo 1. Análisis socio-espacial de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México

Tabla 1 Abastecimiento de agua de la Ciudad de México para el periodo 2008-2013.	39
Tabla 2 Determinantes de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México.	45
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.	47
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.	51
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.	52
Tabla 6 Características de los clústeres espaciales en términos de la distribución por cuartiles de las elasticidades.	55

Capítulo 2. Análisis Espacial y Estimación de la Demanda Urbana de Agua en la Ciudad de México

Tabla 1 Variables independientes utilizadas para el análisis de regresión múltiple de mínimos cuadrados del componente medido de la DUA en las colonias de la Ciudad de México. ...	80
Tabla 2 Características de los tres usos de agua por unidad territorial del PGDUDF.	83
Tabla 3 Caracterización del ambiente urbano construido por unidad territorial PGDUDF en la Ciudad de México.	86
Tabla 4 Coeficientes beta (β) estimados por medio del análisis de regresión múltiple de mínimos cuadrados para los usos doméstico, no doméstico y mixto que conforman el componente medido de la DUA en la Ciudad de México.	87

Capítulo 3. Análisis estacional y espacial de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México (2008-2018)

Tabla 1 Clasificación, definición operativa, unidades y fuentes de obtención de las variables utilizadas para estimar el componente medido de la demanda urbana bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México.	108
Tabla 2 Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas para analizar el componente medido de la demanda urbana de agua en forma bimestral en las alcaldías de la CDMX, durante el periodo 2008-2018. Variable dependiente = miles m ³ bimestre.	112
Tabla 3 Coeficientes tendenciales, estacionales, de micromedición y de acceso al agua para estimar el uso doméstico bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	115
Tabla 4 Coeficientes tendenciales, estacionales, de micromedición y de acceso al agua para estimar el uso mixto bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	116
Tabla 5 Coeficientes tendenciales, estacionales, de micromedición y de acceso al agua para estimar el uso no doméstico bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	117
Tabla 6 Demanda urbana bimestral de agua estimada para las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	121
Tabla 7 Resultado del análisis de varianza de un factor para la demanda urbana de agua bimestral estimada en las alcaldías de la CDMX para el periodo 2008-2018.	122
Tabla 8 Características de los clústeres espaciales de la intensidad de los usos doméstico, mixto y no doméstico de agua en las alcaldías de la Ciudad de México.	124
Tabla 9 Uso doméstico, mixto y no doméstico en las alcaldías de la Ciudad de México (promedio bimestral 2008-2018).	135
Tabla 10 Usuarios domésticos, mixtos y no domésticos con medidor y sin medidor en las alcaldías de la Ciudad de México (promedio bimestral 2008-2018).	135
Tabla 11 Reportes de falta de agua, de fugas, de mala calidad y días de suministro continuo en las alcaldías de la Ciudad de México (promedio bimestral 2008-2018).	136
Tabla 12 Estadísticas descriptivas de la comparación entre los valores predichos y medidos para el uso doméstico en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	140

Tabla 13 Estadísticas descriptivas de la comparación entre los valores predichos y medidos para el uso mixto en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	140
Tabla 14 Estadísticas descriptivas de la comparación entre los valores predichos y medidos para el uso no doméstico en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	141

Capítulo 4. Extracción y demanda urbana de agua a nivel de alcaldía en la Ciudad de México para el periodo 2008-2018

Tabla 1 Caudales abastecidos a la Ciudad de México durante el periodo 2008-2018.	146
Tabla 2 Caudales abastecidos a la Ciudad de México (2008-2018) desglosados según la ubicación de la fuente.	150
Tabla 3 Balance Extracción-Demanda e Intensidad del uso de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	152
Tabla 4 Características de las viviendas en los clústeres espaciales del Balance Extracción-Demanda de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	156
Tabla 5 Características de las unidades económicas en los clústeres espaciales del Balance Extracción-Demanda de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).	156
Tabla 6 Características sociodemográficas con respecto de la intensidad de uso del agua en las áreas continuas de abasto externo a la CDMX (2008-2018).	161
Tabla 7 Clases de vivienda con respecto a los clústeres espaciales de intensidad de uso de agua, balance extracción-demanda y suministro en la Ciudad de México (2008-2018). ...	163
Tabla 8 Tamaño de establecimientos de las unidades económicas, con respecto a los clústeres espaciales de intensidad de uso de agua, balance extracción-demanda y suministro en la Ciudad de México (2008-2018).	163
Tabla 9 Balance extracción-demanda y promedio de días de suministro continuo según tipo de suelo en la Ciudad de México (2008-2018).	166
Tabla 10 Extracción de agua subterránea y superficial por fuente de abastecimiento de agua para la Ciudad de México (2008-2018).	167

Nota complementaria 1. Sobre el uso del concepto de demanda urbana de agua

Tabla 1 Matriz de correlaciones de las variables independientes para explicar el uso doméstico de agua a nivel colonia, en la Ciudad de México para el año 2010.	189
Tabla 2 Coeficientes beta, error estándar, valor de t, valor de p e índice de inflación de la varianza del modelo de regresión múltiple OLS que explica el uso doméstico anual de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.	190
Tabla 3 Matriz de correlaciones de las variables independientes para explicar el uso mixto de agua a nivel colonia, en la Ciudad de México para el año 2010.	191
Tabla 4 Coeficientes beta, error estándar, valor de t, valor de p e índice de inflación de la varianza del modelo de regresión múltiple OLS que explica el uso mixto anual de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.	191
Tabla 5 Matriz de correlaciones de las variables independientes para explicar el uso no doméstico de agua a nivel colonia, en la Ciudad de México para el año 2010.	193
Tabla 6 Coeficientes beta, error estándar, valor de t, valor de p e índice de inflación de la varianza del modelo de regresión múltiple OLS que explica el uso no doméstico anual de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.	194
Tabla 7 Total de tomas instaladas en el año 2010 con la tarifa correspondiente a uso no doméstico según el tamaño de su diámetro.	194
Tabla 8 Estudios sobre demanda, uso y consumo de agua en diferentes ciudades del mundo	202

Nota complementaria 2. Sobre los ajustes de los modelos estadísticos presentados en los capítulos 1 y 2

Tabla 1 Estadísticas descriptivas de la variable dependiente y las variables independientes seleccionadas para analizar la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México, 2010.	208
Tabla 2 Matriz de correlaciones entre todas las variables bajo análisis.	209
Tabla 3 Valores para la I de Moran y significatividad de las variables estudiadas en el Capítulo 1.	210

Tabla 4 Coeficientes beta, valores t, valores de p y factor de inflación de la varianza de las variables del modelo de regresión lineal múltiple OLS que explica la demanda doméstica de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.	211
Tabla 5 Variabilidad Geográfica de los coeficientes locales estimados a partir del modelo de regresión GWR que explica la demanda doméstica de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.	211
Tabla 6 Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas para estimar los usos doméstico, mixto y no doméstico de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.....	213
Tabla 7 Factores de inflación de la varianza de los modelos de regresión lineal múltiple utilizados para estimar los usos doméstico, mixto y no doméstico de agua en las colonias de la Ciudad de México. Año 2010.....	214

Introducción

El consumo de agua a nivel mundial se sextuplicó durante el periodo de 1900 a 1995 (Bahri, 2011), lo que ha traído consigo una serie de retos en un mundo donde la mayoría de los habitantes residen en áreas urbanas (House-Peters y Chang, 2011; UN, 2018). Estas dos condiciones han ido de la mano con la creciente dificultad para construir nueva infraestructura de abasto de agua para las ciudades, acción que se ha vuelto más compleja en términos políticos, sociales, económicos y ambientales (Baumann y Boland, 1997). Este contexto se presenta como un escenario de tormenta perfecta que compromete la sustentabilidad urbana en el largo plazo (Saurí, 2013), ya que, cada vez se hace uso de recursos cada vez más lejanos (Bell, 2018).

Por estas razones, se han tenido que replantear los objetivos de la gestión del agua para orientarlos hacia la sustentabilidad (Kayaga y Smout, 2011; Bell, 2018). Lo que ha implicado enfocarse en entender de manera conjunta las dinámicas de los sistemas naturales y sociales (House-Peters y Chang, 2011) para plantear metas de largo plazo (Baumann y Boland, 1997; Kayaga y Smout, 2011). Es así como surgió el paradigma de la Gestión Integrada del Agua Urbana (GIAU), cuyo enfoque se centra en la comprensión del ciclo hídrico en las zonas urbanas, incluyendo la dinámica de los flujos naturales, los distintos tipos de actores sociales, además de la infraestructura para el abasto, el desagüe, el tratamiento y el reúso del agua que componen este ciclo metabólico (Bahri, 2011; Bell, 2018). En particular, se trata de un paradigma que aborda la gestión de la demanda de agua y la concibe como un mismo proceso en relación con el abasto (Mitchell, 2006; Bahri, 2011).

Este nuevo paradigma representa un marco para concretar el desarrollo sustentable dentro del sector hídrico (Tiburcio y Perevochtchikova, 2012), que a su vez es adaptable a diferentes contextos locales (Bahri, 2011). Esta nueva concepción se centra en entender la demanda de agua de manera multifacética (Pinkham, 1999; Mitchell, 2006).

El concepto de demanda urbana de agua se define como el volumen necesario que requiere un organismo operador para abastecer a los usuarios en un tiempo determinado (Billings y Jones, 2008); el cual contempla al componente medido, al agua no contabilizada y a los caudales que se pierden en fugas dentro de un sistema (Bell, 2018). Esta definición

proviene desde una visión centrada en el abastecimiento público, en la que se plantea que la demanda urbana de agua es equivalente al volumen de agua producida, cuando no existen pérdidas sistémicas (Billings y Jones, 2008). En este mismo orden de ideas, esta definición es la que se maneja en el quehacer de los organismos operadores de agua encargados de la prestación de los servicios hidráulicos (suministro de agua potable, drenaje y alcantarillado) para la población, quienes conciben este concepto como la suma de los volúmenes consumidos más las pérdidas (CONAGUA, 2019a:7; 2019b:44). Dado que una de las prioridades de la GIAU es la gestión de la demanda de agua, autores como Baumann y Boland (1997), Brooks (2007) y Kayaga y Smout (2011) señalan que abarca los siguientes rubros:

- Disminuir los flujos de agua para abastecer las áreas urbanas.
- Reducir las pérdidas de caudales.
- Evaluar diferentes tipos de opciones para el abasto de las ciudades.
- Implementar medidas para la conservación del agua, que logren reducir los caudales utilizados.
- Variar el uso de agua según los picos de demanda.
- Incrementar la habilidad de los sistemas para que el suministro sea continuo, pese a cualquier situación adversa.
- Generar cambios a nivel administrativo.
- Disminuir los flujos de aguas residuales, contemplando su tratamiento.
- Ajustar el uso del agua según la calidad requerida.

Para abordar estos puntos se deben conocer los determinantes que causan la demanda urbana de agua, en particular los que comprenden al componente medido (Bell, 2018). En general, los estudios que se han realizado sobre este tema apuntan a determinantes climáticos, socioeconómicos y los referentes al precio por la prestación de los servicios hidráulicos (Arbués *et al.*, 2003; Worthington y Hoffman, 2008). Sin embargo, también se han explorado los patrones espaciales de consumo al interior de las ciudades, mediante técnicas ligadas al uso de los Sistemas de Información Geográfica (House-Peters y Chang, 2011). De esta forma, el análisis socio-espacial ha cobrado relevancia porque permite realizar análisis estadísticos y cuantitativos para estudiar datos distribuidos en el espacio geográfico, entendido como un

modelo digital, según se plantea desde el paradigma geotecnológico y la Geografía Global (Buzai y Baxendale, 2011).

Por otra parte, el tipo de construcciones y la densidad urbana se han evidenciado como determinantes útiles para entender el consumo de agua (Saurí, 2013; Stoker *et al.*, 2019), lo que ha generado pautas importantes para vincular el desarrollo urbano con la gestión hídrica (Bahri, 2011; Gober *et al.*, 2013). Entre los resultados que se han obtenido, destacan que el tamaño del hogar (personas por vivienda) tiende a incrementar el consumo doméstico de agua, que también se caracteriza por su comportamiento estacional debido a los usos exteriores como el riego de jardines y el llenado de albercas (Arbués *et al.*, 2003; Worthington y Hoffman, 2008). Estas características se relacionan con patrones de suburbanización, por lo que, el aumento de la densidad urbana y la apuesta por el desarrollo de conjuntos multifamiliares se han planteado como una forma para reducir los volúmenes de agua requerida (Saurí, 2013; Chang, 2017).

Estos determinantes se han estudiado en ciudades de Estados Unidos, Europa y Australia (Worthington y Hoffman 2008; Saurí 2013). En cuanto a las ciudades pertenecientes a países en vías de desarrollo, se debe tomar en cuenta que la prestación de los servicios hidráulicos, al igual que el consumo de agua, muestran marcadas diferencias entre la población, situación que va acompañada por los altos niveles de agua no contabilizada y por las pérdidas de caudales (Bell, 2018).

En América Latina el 81% de la población habita en áreas urbanas (UN, 2018), que no son ajenas a la dinámica mundial marcada por los impactos ambientales, sociales y económicos relacionados con el abasto de agua (Perevochtchikova, 2015). En el caso de México, los datos censales del año 2020 señalan que 99.2 millones de personas residen en localidades urbanas con más 2,500 habitantes, lo que representa el 79% de la población total (INEGI, 2021). En términos de la disponibilidad anual de agua, a nivel nacional se cuenta con un promedio de 3,656 m³ por habitante, mientras que la Región Hidrológico-Administrativa XIII “Aguas del Valle de México” es el caso más crítico del país, ya que, su disponibilidad es de 144 m³ de agua por habitante al año (CONAGUA, 2018). La importancia de esta Región radica en que alberga a la Ciudad de México (CDMX), que es una de las mega-urbes latinoamericanas, además de la capital mexicana (Perevochtchikova, 2015).

El caso de la Ciudad de México se destaca por enfrentar varios retos relacionados con la gestión del agua. Por una parte, se enfrenta a la subsidencia diferencial del terreno debida a la extracción de agua subterránea (Martínez *et al.*, 2015), acompañada por la operación de infraestructura que se caracteriza por presentar restricciones y distintos grados de vulnerabilidad (Escolero *et al.*, 2016). En términos de la distribución del agua, existe suministro intermitente dentro de la ciudad y de los municipios conurbados que la rodean (Morales y Rodríguez, 2009), además de un acceso al agua variable, reflejado en las condiciones de calidad y de frecuencia con las que se recibe el agua que llega a las viviendas (Jiménez *et al.*, 2011). Por otra parte, los caudales perdidos en fugas se estiman en 40% del total abastecido (SACMEX, 2019). Estos retos han sido acompañados por conflictos sociales y políticos como consecuencia de la consolidación del sistema regional de abasto, que vincula artificialmente tres cuencas (Perló y González, 2009). Pese a estos puntos que sintetizan una problemática compleja, es importante mencionar que en los programas gubernamentales hace falta un diagnóstico sobre los determinantes que generan la demanda de agua; ya que, en ellos sólo se considera la relación entre el consumo de agua y el crecimiento poblacional (GDF, 2007; GDF, 2012; GCDMX, 2016).

En general, la demanda de agua en la CDMX ha recibido poca atención en comparación con otros temas relativos a la gestión del agua. Entre los estudios que la abordan, se encuentran el de Downs *et al.* (2000), donde se calculó una estimación basada en coeficientes *per cápita* de uso del agua según un estudio realizado por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH)¹; posteriormente, estos coeficientes se relacionaron con una estimación de crecimiento poblacional para los municipios y delegaciones (hoy alcaldías) que componen la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. El resultado refiere un rango de demanda para la CDMX entre 24.4 y 31.4 m³/s. Por otra parte, en GDF (2007) se menciona que el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) hace una entrega efectiva de 22.3 m³/s a los usuarios de agua en la ciudad. En SACMEX (2019:62) aparecen datos de consumo *per cápita* para el periodo 2009-2017; con esta información se calcula un promedio de 18.52 m³/s de consumo de agua.

¹ Esta institución antecedió al Sistema de Aguas de la Ciudad de México en la prestación de los servicios hidráulicos. El estudio que se menciona en Downs *et al.* (2000) plantea características de consumo del agua medidas en la hoy alcaldía de Miguel Hidalgo.

A pesar de la similitud que muestran estas cifras para el contexto global de la ciudad, no es posible abordar las diferencias espacio temporales en su interior. Aunado a ello, los estudios no aportan mayor información sobre los determinantes que causan la demanda urbana de agua. Estos dos puntos faltantes, son cruciales para la implementación de acciones para su gestión. Ante esta situación, se plantea como pregunta general de investigación: ¿Qué determinantes permiten diagnosticar de forma integrada, espacial y estacional la demanda urbana de agua en la Ciudad de México? A partir de este planteamiento se derivan las siguientes preguntas específicas de investigación:

- ¿Qué determinantes demográficos, sociales, económicos y de densidad urbana explican el componente medido de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México?
- ¿Cuánta agua se utiliza en la Ciudad de México?
- ¿Cómo es la distribución espacial y el comportamiento estacional de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México, así como de su intensidad de uso?
- ¿Cuáles son las zonas prioritarias para implementar acciones de gestión de la demanda de agua en la Ciudad de México?

Como hipótesis de investigación, se plantea que la demanda urbana de agua en la Ciudad de México responde a determinantes como la cobertura de micromedición y el acceso al agua, que a su vez son dos características que se relacionan con las condiciones socioeconómicas de la población. Estos determinantes permiten conocer el volumen de agua que requiere la ciudad, además de brindar cifras para comparar con el abastecimiento. De igual forma, la distribución espacial de la demanda urbana de agua varía según la ubicación de los usuarios y sus características socioeconómicas.

En seguimiento a estos planteamientos, el presente trabajo tiene como objetivo general presentar un diagnóstico de la demanda urbana en la Ciudad de México, a través de sus determinantes, distribución espacial y comportamiento estacional durante el periodo 2008-2018, a nivel de colonia y de alcaldía. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Explicar el componente medido de la demanda urbana de agua a partir de determinantes demográficos, sociales, económicos y de densidad urbana en la Ciudad de México.
- Estimar la demanda urbana de agua de la Ciudad de México.
- Analizar la distribución espacial y el comportamiento estacional de la demanda urbana de agua en forma bruta y en términos de su intensidad de uso.
- Detectar las zonas prioritarias de la Ciudad de México para la implementación de acciones hacia la gestión de la demanda de agua.

Dado que los objetivos del presente trabajo se centran en el análisis de la distribución espacial y también en el comportamiento estacional que muestra la demanda urbana de agua, se utilizaron dos unidades espaciales de análisis: las colonias y las alcaldías. Estas unidades se escogieron por el tipo de información que fue brindada por el SACMEX a través de su portal de transparencia. El periodo de estudio correspondió a los años de 2008-2018, para contar con una visión de mediano plazo (Billings y Jones, 2008).

Dado que la CDMX carece de una cobertura universal de micromedición (Martínez, 2004), los análisis se basaron en los determinantes del componente medido de la demanda urbana de agua. Este componente se refiere a los volúmenes medidos de los usos doméstico, mixto y no doméstico según la Ley de Aguas del Distrito Federal (ALDF, 2003). De la misma manera, la intensidad de uso de agua corresponde a la demanda estimada dividida entre el total usuarios. En este punto, el concepto de usuario se retoma desde la definición que aparece en ALDF (2003), que hace referencia a las personas físicas o morales que utilizan uno o más de los servicios hidráulicos que presta el SACMEX (suministro de agua potable, drenaje y alcantarillado); adicionalmente el uso doméstico abarca las tomas de agua instaladas en inmuebles habitacionales, el uso mixto a las tomas que se encuentra en inmuebles destinados a uso habitacional y no habitacional conjuntamente, mientras que el uso no doméstico se trata de las tomas instaladas en inmuebles no habitacionales.

Haciendo referencia a las definiciones de demanda urbana de agua que se exponen en Billings y Jones (2008), CONAGUA (2019a) y CONAGUA (2019b), la presente investigación se centra en una visión desde el abastecimiento público, que corresponde al

quehacer de los organismos operadores. El eje principal que se toma es el análisis espacial y estacional, para generar un diagnóstico de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México. En adición a este planteamiento, en Billings y Jones (2008) y en CONAGUA (2019b) también se menciona que la demanda de agua cuenta con una definición en términos económicos que incluye el precio que se cobra por el suministro de agua, cuya utilidad radica en el diseño de esquemas tarifarios. En el caso de esta investigación, se dejó de lado este tema para enfatizar el análisis en los determinantes del componente medido y en la estimación del agua no contabilizada en la ciudad, como lo marcan Bell (2018) y CONAGUA (2019a; 2019b). En cuanto al componente de pérdidas, sólo se realizó su contextualización comparándolo con el abastecimiento total de agua. (Véase Nota complementaria 1).

En el primer capítulo se analizó del uso doméstico anual a nivel colonia para el año 2010. Se exploró la relación entre este uso con determinantes como el porcentaje de micromedición, variables de acceso al agua (viviendas con toma interna de agua y suministro intermitente) y de tipo socioeconómico (Índice de Desarrollo Social CDMX -IDS-), además de la densidad de vivienda. Para realizar este análisis se utilizaron la regresión lineal múltiple de mínimos cuadrados (OLS) y la regresión geográficamente ajustada (GWR). En el primer caso, se obtuvo un resultado global y estacionario, mientras que con el segundo método fue posible explorar la variación espacial de los determinantes con respecto al uso doméstico de agua. Se generaron dos estimaciones de la demanda doméstica de agua a partir de ambos modelos.

En el segundo capítulo, se abordaron los tres usos del agua a nivel colonia en forma anual para el año 2010. En este caso, el análisis se realizó en función de variables que caracterizan el ambiente urbano construido, para ello se utilizó una tipología de domicilios definida por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); también se incluyeron las áreas de los predios y su densidad, además de la micromedición y el acceso al agua, medido a partir de las colonias que son abastecidas de manera intermitente. Se presentó una estimación para la demanda urbana de agua de toda la ciudad y se calculó la intensidad de uso del agua. La información obtenida desde las colonias se agrupó según las unidades territoriales establecidas en el Programa de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, vigente

desde 2003, para establecer un punto de relación entre el desarrollo urbano y la gestión del agua.

En el tercer capítulo se estudiaron los tres usos de agua a nivel de alcaldía, en forma bimestral durante el periodo 2008-2018. Para estos análisis se incluyó la micromedición de cada uno de los usos. El acceso al agua se midió a través de los reportes de falta de agua y de mala calidad que recibe el SACMEX, de igual manera se contempló el número de días promedio en que se recibe suministro continuo en cada una de las alcaldías. También se incorporaron los reportes de fugas, además de los componentes tendenciales y estacionales. Se analizaron espacialmente los coeficientes obtenidos, para detectar las áreas donde tienen efecto temporal, estacional y espacial sobre el componente medido de la demanda urbana de agua. Adicionalmente, se estimó la demanda urbana de agua en forma bimestral (incluyendo el agua no contabilizada) y se calcularon las intensidades de uso del agua a nivel de alcaldías. Se analizaron los patrones espaciales de las intensidades y se caracterizaron las áreas resultantes a partir de los datos censales del INEGI.

En el capítulo cuatro se presenta un balance local calculado a partir de datos de extracción de agua superficial y subterránea, en comparación con la demanda urbana de agua estimada. Se analizaron espacialmente cuatro aspectos de la gestión: (1) la extracción de agua subterránea y superficial; (2) la demanda urbana de agua estimada; (3) el balance entre la extracción y la demanda; y (4) la intensidad de uso de agua a nivel de alcaldía. Para estos análisis se utilizaron los promedios del periodo 2008-2018. Estos cuatro rubros permiten relacionar el sistema regional de abasto y la dinámica local de la demanda urbana de agua, así como de la intensidad de uso. Para visualizar espacialmente estas relaciones, se crearon las áreas continuas de abasto externo a partir de las alcaldías abastecidas por las diferentes fuentes externas; en ellas se realizó análisis espacial y caracterización socioeconómica. Se tomó en cuenta el papel que juega el Suelo de Conservación al sur de la CDMX, donde se recargan los acuíferos que proveen el 40% del abasto total de agua.

Finalmente, al término del texto se encuentran dos notas complementarias. En la primera se aborda algunos puntos sobre el uso del término demanda de agua, en relación con su definición. Dado que en el capitulo no se abordó el tema del esquema tarifario vigente en la Ciudad de México, en el apartado que comprende la primera nota complementaria se

expone una propuesta sobre cómo relacionarlo con los tres usos agua a nivel colonia; este análisis corresponde al año 2010. La segunda nota complementaria, contiene algunos elementos sobre los ajustes de los modelos estadísticos presentados en los capítulos uno y dos, además de un mapa de referencia con los nombres de las 16 alcaldías que componen la ciudad. Los insumos generados en esta investigación representan una forma de entender la gestión del agua de una manera integrada con una visión espacial. Se trata de un diagnóstico que se centra en las diferencias que muestra la demanda de agua al interior de la ciudad, al igual que propone una forma para relacionar la dinámica del sistema regional de abasto con el consumo local de las alcaldías.

Referencias

- ALDF [Asamblea Legislativa del Distrito Federal]. (2003). Ley de Aguas del Distrito Federal. México, DF: Gobierno del Distrito Federal.
- Arbués, F., García-Valiñas, M., y Martínez-Espiñeira, R. (2003). Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review. *Journal of Socio-Economics*, 32, 81-102. doi: [https://doi.org/10.1016/S1053-5357\(03\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S1053-5357(03)00005-2)
- Bahri, A. (2011). *Integrated Urban Water Management*. Stockholm: Global Water Partnership.
- Baumann, D., y Boland, J. (1997). The Case for Managing Urban Water. In D. Baumann, J. Boland, y W. Hanemann, *Urban Water Demand Management and Planning* (pp. 1-30). Nueva York: Mc Graw Hill.
- Bell, S. (2018). *Urban Water Sustainability. Constructing infrastructure for cities and nature*. Nueva York: Routledge.
- Billings, R., y Jones, C. (2008). *Forecasting Urban Water Demand* (2 ed.). Denver: American Water Works Association.
- Brooks, D. (2007). An Operational Definition of Water Demand. *International Journal of Water Resources Development*, 22(4), 521-528. doi: <https://doi.org/10.1080/07900620600779699>

- Buzai, G., y Baxendale, C. (2011). *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Temáticas de base raster*. Buenos Aires: Lugar.
- Chang, H. (2017). Water Conservation. In D. Richardson (Ed.), *The international encyclopedia of geography : people, the earth, environment, and technology* (pp. 7623-7628). Chichester, West Sussex: Wiley Blackwell.
- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2019a). *Biblioteca Digital de MAPAS*. (S. d. Naturales, Editor) Recuperado el 26 de 10 de 2021, de Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado. Libro 4: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>
- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2019b). *Biblioteca Digital de MAPAS*. (S. d. Naturales, Editor) Recuperado el 2021 de 10 de 26, de Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Estructuras Tarifarias. Libro 54: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro54.pdf>
- Downs, T., Mazari-Hiriart, M., Domínguez-Mora, R., y Suffet, I. (2000). Sustainability of least cost policies for meeting Mexico City's future water demand. *Water Resources Research*, 36(8), 2321-2339. doi: <https://doi.org/10.1029/1999WR900234>
- Escolero, O., Kraslisch, S., Martínez, S., y 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.
- GCDMX [Gobierno de la Ciudad de México]. (2016). *Programa de Sustentabilidad y Gestión de los Servicios Hídricos*. Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México.

- GDF [Gobierno del Distrito Federal]. (2007). *Programa de Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México*. Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente, Secretaría de Obras y Servicios, Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- GDF [Gobierno del Distrito Federal]. (2012). *Programa de Gestión Integral de los Recursos Hídricos, Visión 20 Años*. Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente, Sistemas de Agua de la Ciudad de México.
- Gober, P., Larson, K., Quay, R., Polsky, C., Chang, H., y Shandas, V. (2013). Why Land Planners and Water Managers Don't Talk to One Another and Why They Should? *Society and Natural Resources*, 26(3), 356-364. doi: <https://doi.org/10.1080/08941920.2012.713448>
- GWP [Asociación Mundial para el Agua]. (2000). *Integrated Water Resources Management*. Estocolmo, Suecia: Global Water Partnership.
- House-Peters, L., y Chang, H. (2011). Urban water demand modeling: Review of concepts, methods and organizing principles. *Water Resources Research*, 47(5). doi: <https://doi.org/10.1029/2010WR009624>
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. (16 de 03 de 2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Obtenido de Datos abiertos: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Datos_abiertos
- Jiménez, B., Gutiérrez, R., Marañón, B., y González, A. (2011). *Evaluación de la política de acceso al agua potable en el Distrito Federal*. México: Evalúa DF-PUEC-UNAM.
- Kayaga, S., y Smout, I. (2011). *Water Demand Management in the City of the Future*. Leicestershire: WEDC, Loughborough University.
- Martínez, M. (2004). La participación de la empresa privada en la gestión de servicios de agua en el Distrito Federal. In H. Libreros, R. López, M. Martínez, J. Montesillos, G. Ortiz, y A. Quiñones, *Gestión del agua en el Distrito Federal retos y propuestas* (pp. 15-57). México, DF: PUEC-UNAM.
- Martínez, S., Escolero, O., y 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. doi: <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0010-y>

Mitchell, G. (2006). Applying Integrated Urban Water Management Concepts: A Review of Australian Experience. *Environmental Management*, 37(5), 589-605. doi: <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0252-1>

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

Perevochtchikova, M. (2015). Agua y Ciudad: El Abasto de Agua Potable en la Ciudad de México. En M. Schteingart, y P. Piréz (Edits.), *Dos grandes metrópolis latinoamericanas: Ciudad de México y Buenos Aires. Una perspectiva comparativa* (págs. 239-260). Ciudad de México: El Colegio de México.

Perló, M., y 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: PUEC-UNAM.

Pinkham, R. (1999). *21st Century Water Systems: Scenarios, Visions, and Drivers*. Retrieved 12 15, 2016, from https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/05/RMI_Document_Repository_Public-Rep_rts_W99-21_21CentWaterSys.pdf

SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2019a). *Librería Virtual. Diagnósticos, logros y desafíos SACMEX 2018*. Recuperado el 12 de 05 de 2019, de <http://data.sacmex.cdmx.gob.mx/aplicaciones/libreria/biblioteca/libros/2018/diagnostico-logros-y-desafios-2018.pdf>

Saurí, D. (2013). Water Conservation: Theory and Evidence in Urban Areas of the Developed World. *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 227-248. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-013113-142651>

- Stoker, P., Chang, H., Wentz, G., Crow-Miller, B., Jehle, G., y Bonnette, M. (2019). Building Water-Efficient Cities. *Journal of the American Planning Association*, 85(4), 511-524. doi: <https://doi.org/10.1080/01944363.2019.1638817>
- Tiburcio, A., y Perevochtchikova, M. (2012). Indicadores ambientales en la gestión del agua urbana. In M. Perevochtchikova, *Cultura del agua en México. Conceptualización y vulnerabilidad social*. México, DF: UNAM-Porrúa.
- UN [United Nations]. (16 de 05 de 2018). *Department of Economic and Social Affairs. 2018 Revision of World Urbanization Prospects*. Recuperado el 12 de 10 de 2019, de <https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- Worthington, A., y Hoffman, M. (2008). An Empirical Survey of Residential Water Demand Modelling. *Journal of Economic Surveys*, 22(5), 842-871. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-6419.2008.00551.x>

Capítulo 1. Análisis socio-espacial de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México

Socio-spatial analysis of residential water demand in Mexico City

(Versión adaptada en formato. Texto original (Ramos-Buenos, A.; Perevochtchikova, M.; Chang, H. 2021. Análisis socio-espacial de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México. Tecnología y Ciencias del Agua, 12(2), 59-110), disponible en: <http://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/2414/2294>).

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 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.

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, que causan que el desarrollo de nuevos proyectos de abastecimiento se vuelva cada vez menos viable en términos ambientales y políticos (Baumann y 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 y 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 y 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 y Chang, 2011). Ambos sistemas deben considerarse para alcanzar la integración de los componentes dentro de la gestión del agua (Tiburcio y 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 y

Hoffman, 2008; March y 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 y Carvalho, 2014), y otro para la ciudad de Hermosillo, México (Ojeda, Álvarez, Ramos, y 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, y Shandas, 2010; Shandas y Parandvash, 2010; Stoker *et al.*, 2019). Se ha encontrado evidencia similar para la ciudad de Auckland, Nueva Zelanda (Ghavidelfar y 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 tienden a incrementarlo, dado que son características típicas de las viviendas con baja densidad urbana (Domene y Saurí, 2006; Wentz y Gober, 2007; De-Maria-André y Carvalho, 2014; Kontokosta y 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, y Martínez-Espiñeira, 2003; Arbués y Villanúa, 2006; Domene y Saurí, 2006; Wentz y Gober, 2007; Worthington y Hoffman, 2008; De-Maria-André y Carvalho, 2014; Kontokosta y 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, y Pradhan, 2007); la raza y la etnicidad, además de las regulaciones de uso del suelo (Turner e Ibes, 2011); el género y el número de baños (De-Maria-André y Carvalho, 2014; Ojeda *et al.*, 2017), y el consumo de energía (Kontokosta y Jain, 2015). Pero también es importante considerar la medición del agua, dado que reduce la demanda doméstica (Worthington y Hoffman, 2008). Se ha encontrado evidencia de este punto en tres ciudades californianas (Tanverakul y 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 y 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 y 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, y Chang, 2010; Chang, Bonnette, Stoker, Crow-Miller, y 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, y 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 y Gober, 2007). Este análisis también se ha utilizado para relacionar las viviendas multifamiliares y el uso de agua en la ciudad de Nueva York, EUA (Kontokosta y 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, y Perevochtchikova, 2015). En síntesis, la ciudad ha estado enfrentando múltiples retos, como infraestructura de abastecimiento vulnerable (Escolero, Kraslisch, Martínez, y Perevochtchikova, 2016); conflictos políticos y sociales (Perló y González, 2009); cortes de agua y suministro intermitente (Morales y Rodríguez, 2009), así como variable acceso al agua (Jiménez, Gutiérrez, Marañón, y 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.

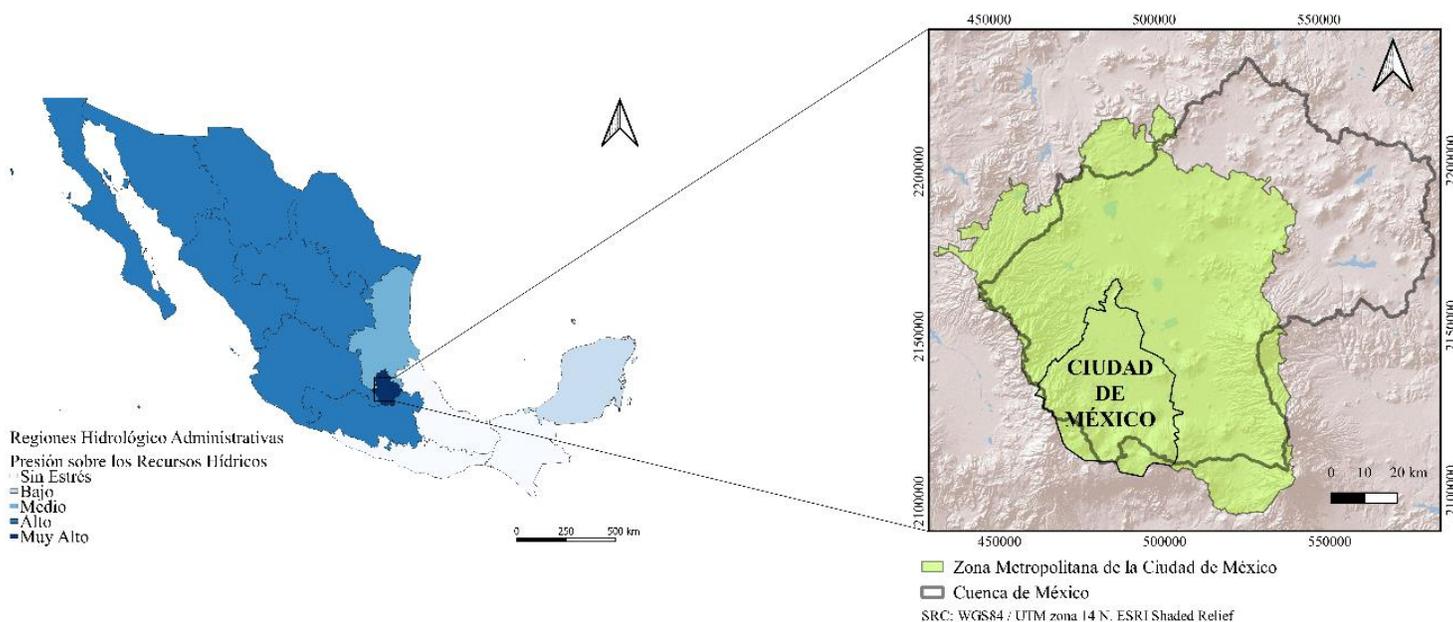
En este sentido, el presente estudio propone el análisis y la estimación de la demanda doméstica de agua para el año 2010 en la Ciudad de México, tomando como base la escala local, considerando determinantes socioeconómicos, de densidad urbana y del acceso al agua; y aplicando dos modelos, uno global 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

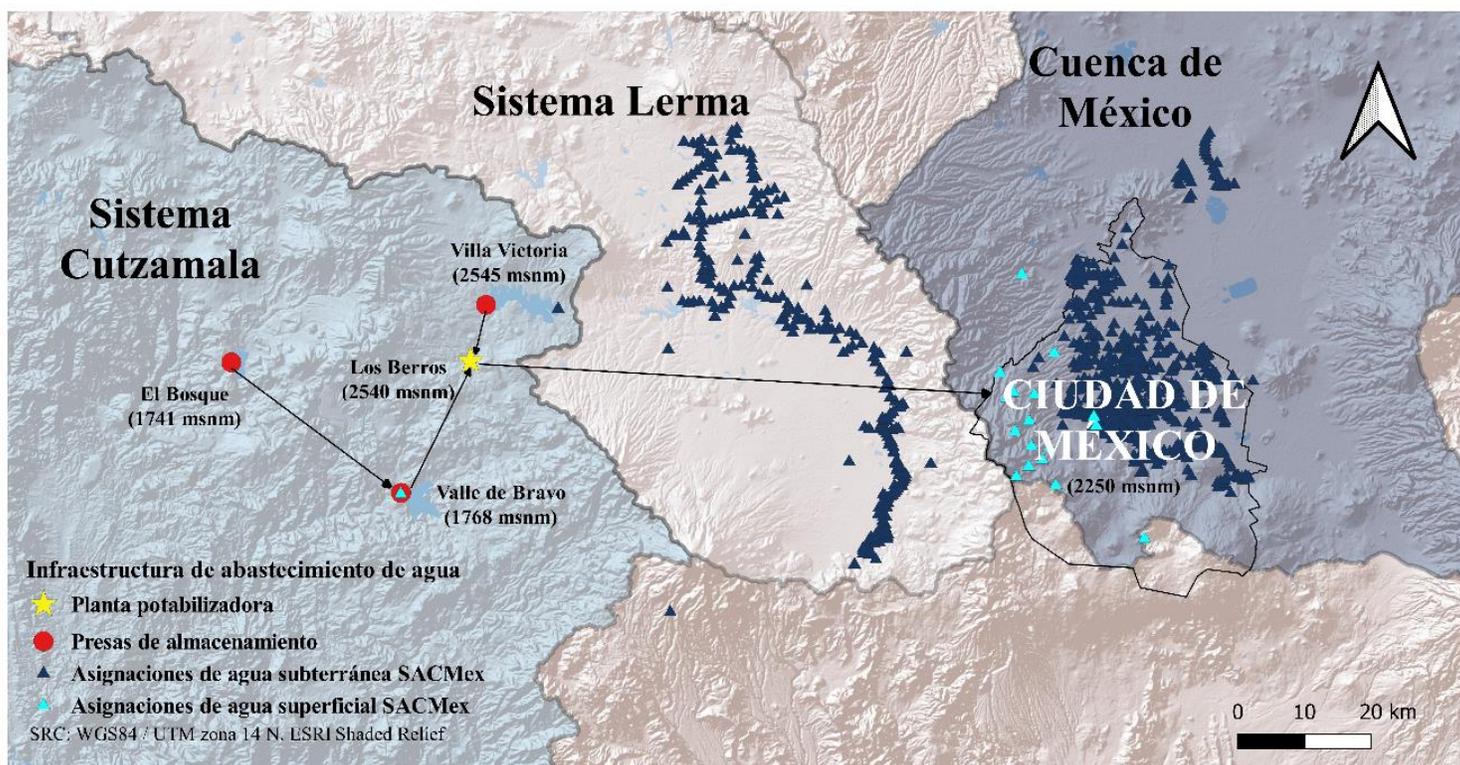
La Ciudad de México cuenta con 8.85 millones de habitantes y pertenece a una zona metropolitana con extensión de 7,854 km², donde residen 22,815,504 personas (INEGI, 2012). En términos de la gestión nacional del agua, este territorio forma parte de la Región Hidrológico-Administrativa (RHA) XIII “Aguas 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).

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 muestran un valor promedio de 31.33 m³/s (Sacmex, 2014b),

Figura 1 Localización de la Ciudad de México.



Infraestructura de Abastecimiento de Agua para 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>.

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.

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
	Superficial	Río Magdalena	0.20	0.62		
		Manantiales	0.76	2.42		
Conagua	Subterránea	Estado de México	Chiconautla	1.42	4.53	
			Chalmita	2.01	6.42	
			La Caldera	0.52	1.66	
			Cutzamala	8.60	27.43	
Cutzamala	Conagua	Superficial				
Lerma	Sacmex	Subterránea		Lerma	4.10	13.08

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos mediante el portal de transparencia, Sacmex (2014b) y Sacmex (2016).

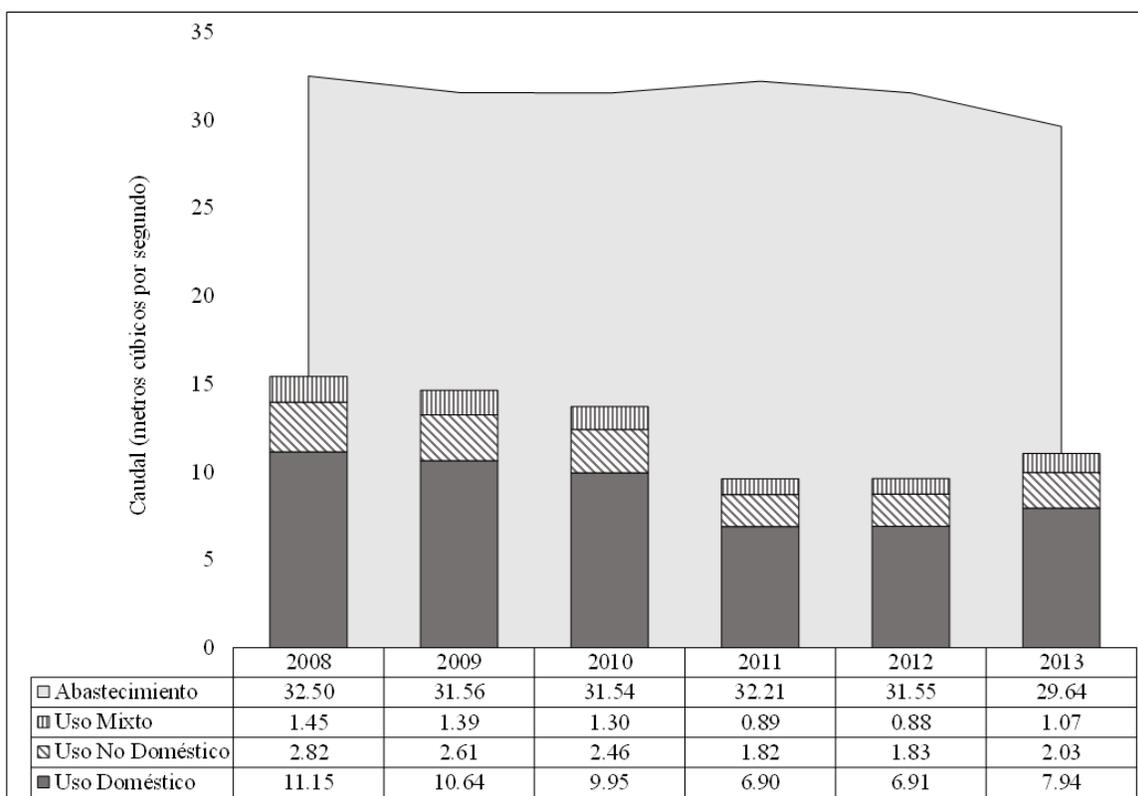
Los sistemas Lerma y Cutzamala se construyeron durante el siglo XX para cubrir las necesidades hídricas de la creciente población de la Ciudad de México, así como para disminuir la subsidencia del suelo en la Cuenca de México, causada por la extracción de agua subterránea (Perló y González, 2009). Esta 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 y 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 y 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 millones 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, Sacmex (2014a) y Sacmex (2014b).

A pesar de la inclusión de 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, y Suffet, 2000; Perló y 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 y 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 y Jones, 2008: 4). En este contexto, existen estudios empíricos que se refieren tanto a la demanda doméstica de agua (Downs *et al.*, 2000; Arbués y Villanúa, 2006; Babel *et al.*, 2007; Wentz y Gober, 2007; Shandas y Parandvash, 2010; Turner e Ibes, 2011; De-Maria-André y Carvalho, 2014; Ashoori, Dzombak, y Small, 2016; Ghavidelfar y Shamseldin, 2017); así como al consumo de agua (Domene y Saurí, 2006; Chang *et al.*, 2010; House-Peters *et al.*, 2010; Ojeda *et al.*, 2017); o al uso de agua (Kontokosta y 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 y 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 y 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 contigüidad 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, y Rigby, 2009; Buzai y Baxendale, 2012). A pesar de que este análisis se ha utilizado previamente con unidades espaciales (Wentz y 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 entre 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 y 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; y (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 y Billings, 2003; Billings y 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 aquellas 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 and 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 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, creada 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 y 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.

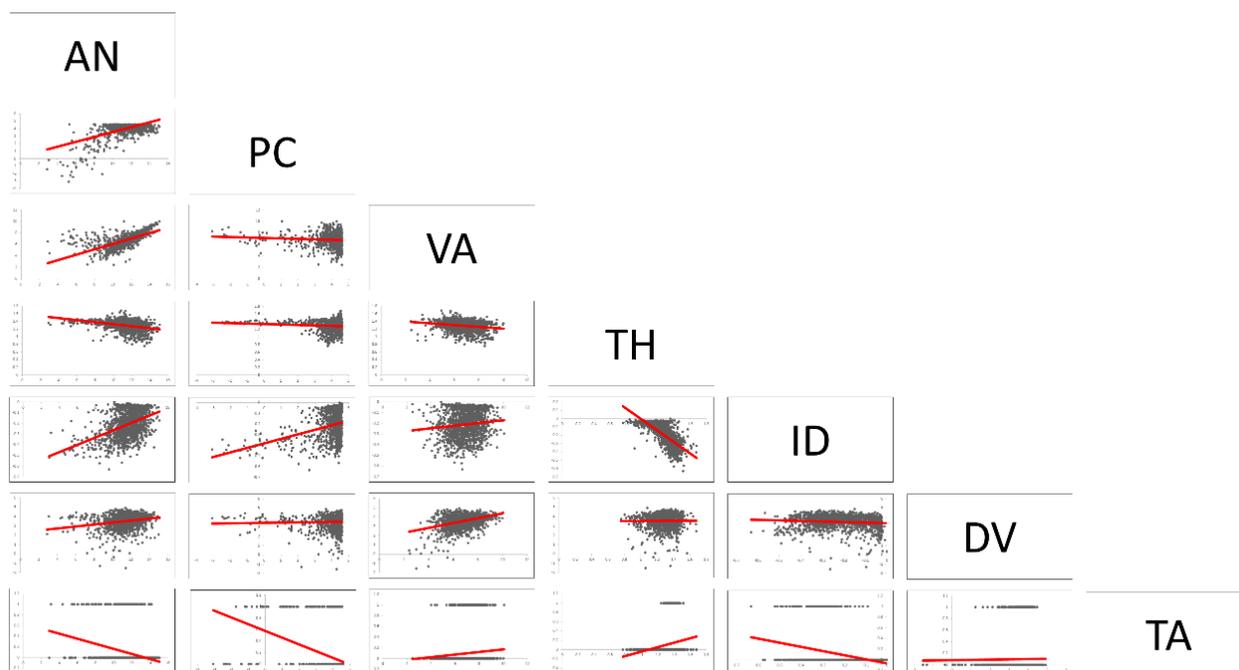
Tabla 3 Estadísticas descriptivas en forma logarítmica de la variable dependiente y las variables independientes seleccionadas para analizar la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México, 2010.

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.



Nota: las variables analizadas son la demanda doméstica de agua anual (AN); los usuarios domésticos con medidor (PC); el total de viviendas con toma interna de agua (VA); el Índice de Desarrollo Social promedio (ID); el suministro intermitente (TA); el tamaño del hogar (TH), y la 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.

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.

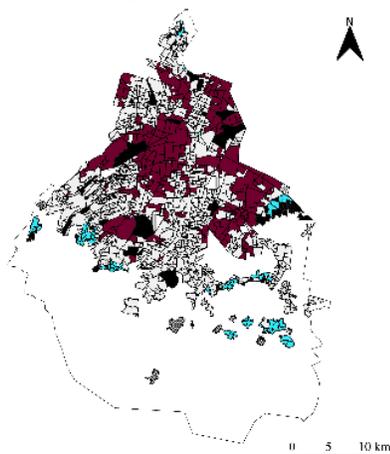
Los clústeres de valores altos de ID en la Figura 4D se localizan principalmente en el lado poniente de la ciudad, en tanto que los valores bajos aparecen en los lados sur y oriente. Algunos valores altos de demanda doméstica de agua en la Figura 4A se enciman con algunos del Índice de Desarrollo Social 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 “Análisis estadístico”. 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

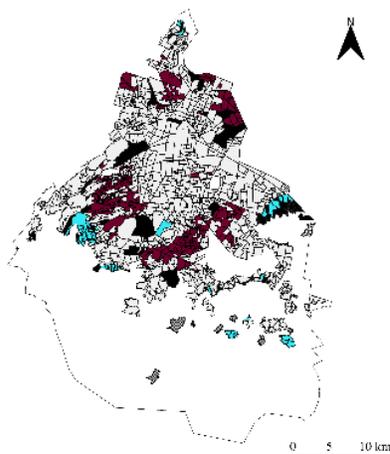
Figura 4 Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA) de las variables dependiente e independientes para el análisis de la demanda doméstica de agua anual en las colonias de la Ciudad de México.

A) Demanda Doméstica de Agua Anual



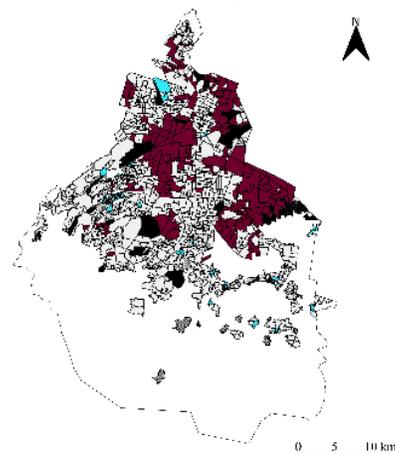
Indicadores Locales de Asociación Espacial
 □ No significativo
 ■ Alto-Alto
 ■ Bajo-Bajo
 ■ Bajo-Alto
 ■ Alto-Bajo
 ■ Sin vecindad
 ■ Polígonos excluidos

B) Usuarios Domésticos con Medidor

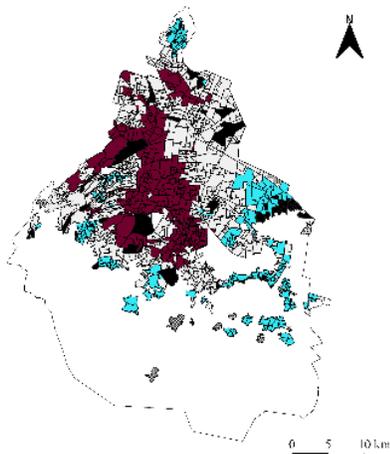


Indicadores Locales de Asociación Espacial
 □ No significativo
 ■ Alto-Alto
 ■ Bajo-Bajo
 ■ Bajo-Alto
 ■ Alto-Bajo
 ■ Sin vecindad
 ■ Polígonos excluidos

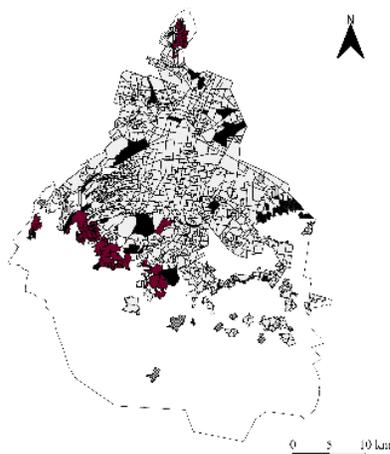
C) Viviendas con Toma Interna de Agua



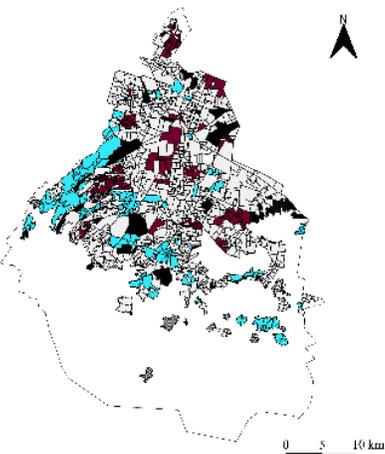
Indicadores Locales de Asociación Espacial
 □ No significativo
 ■ Alto-Alto
 ■ Bajo-Bajo
 ■ Bajo-Alto
 ■ Alto-Bajo
 ■ Sin vecindad
 ■ Polígonos excluidos



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

Nota: los valores altos agrupados aparecen en rojo oscuro, mientras que los valores bajos tienen un color azul claro.

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.

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	2338.67			
n	1346			

Nota: coeficientes beta obtenidos de la Ecuación (1).

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 “Análisis estadístico” 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.

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	2091.96			
n	1346			

Nota: coeficientes beta obtenidos de la Ecuación (2).

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

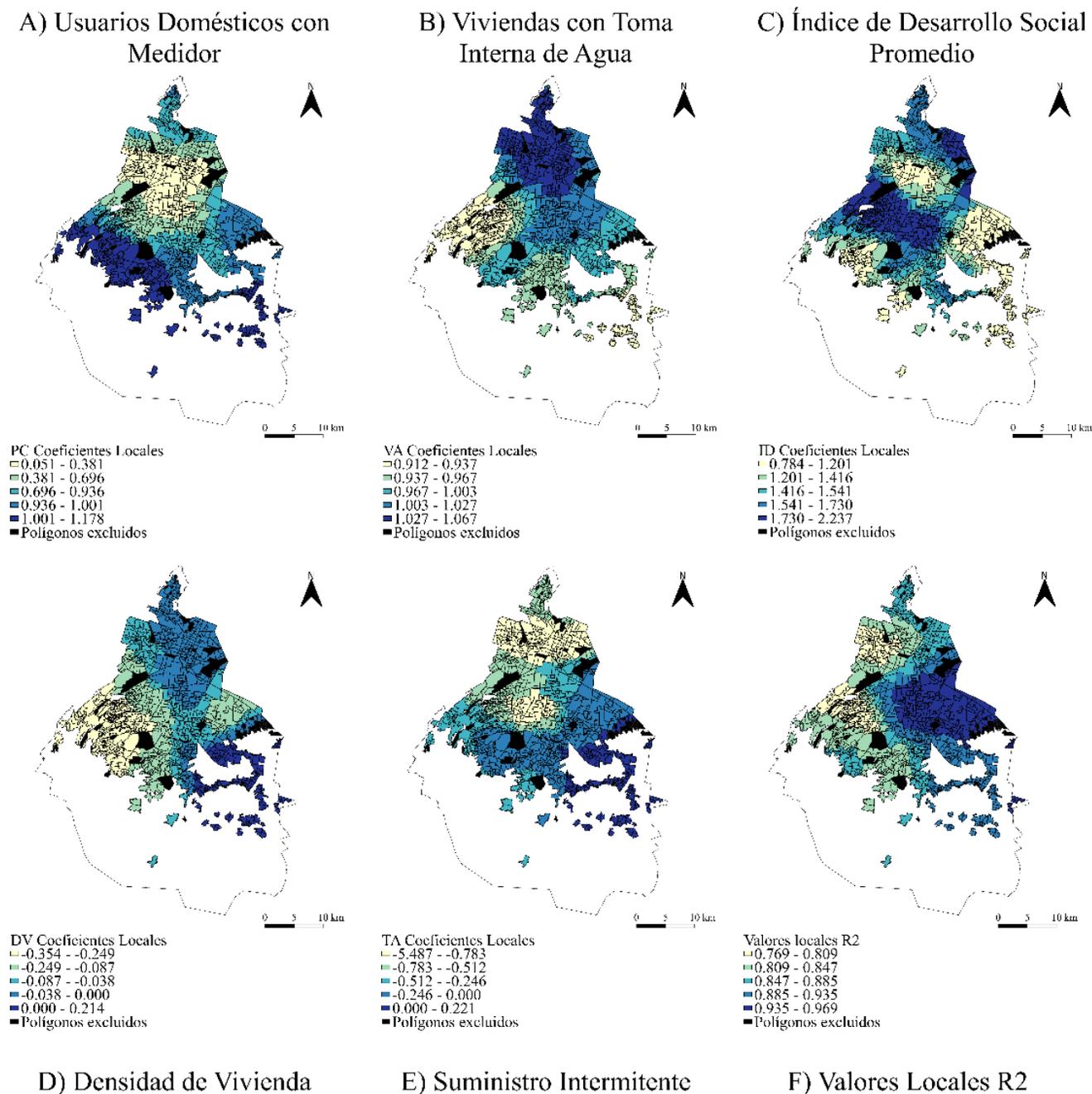
diferencias relevantes que contrastan con el análisis global estacionario de la regresión múltiple OLS. Los coeficientes locales del área de estudio se muestran en la Figura 5.

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 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.

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.



Nota: los coeficientes se interpretan como elasticidades.

Tabla 6 Características de los clústeres espaciales en términos de la distribución por cuartiles de las elasticidades.

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

Clústeres 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).

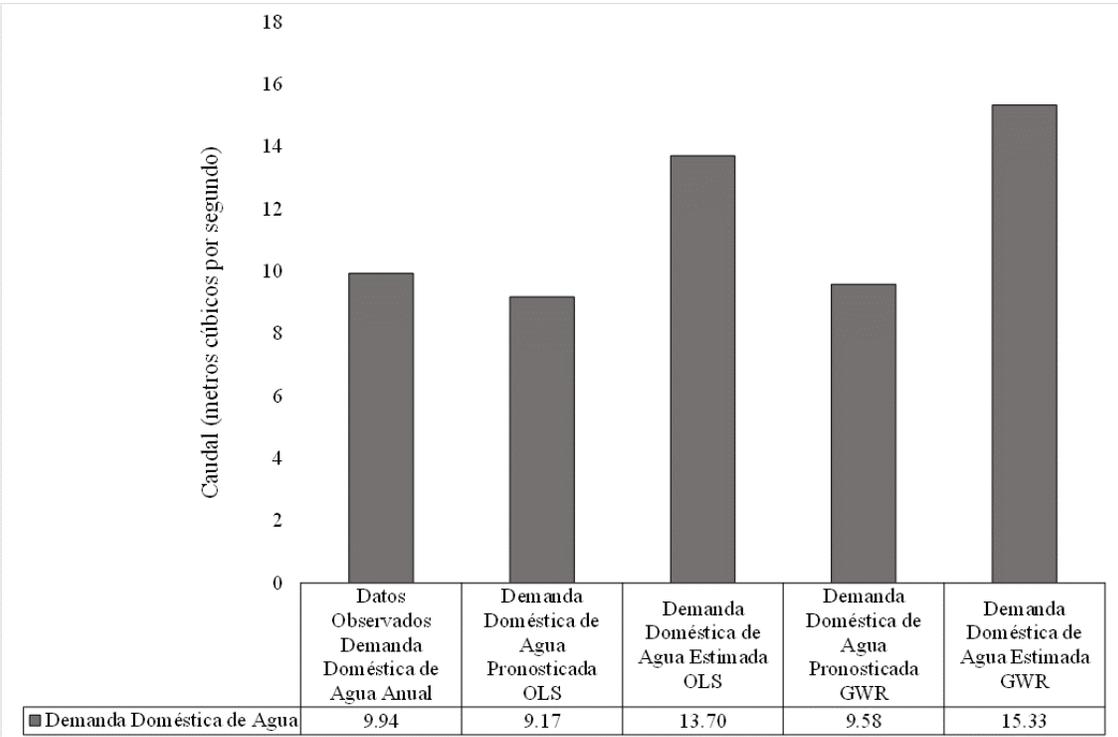
Los clústeres de colonias con demanda alta de agua se caracterizan por un alto número de viviendas con toma interna de agua, tamaño del hogar pequeño, alto Índice de Desarrollo Social promedio y alta densidad de vivienda. Estas zonas también se caracterizan por un bajo

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.



Nota: 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 las 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, destacan 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 y 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 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 de 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., y Billings, R. (2003). Elasticity of demand for water resource managers. In: Agthe, D., Billings, R., y 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., y 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., y 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., y 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., y Pradhan, P. (2007). A multivariate econometric approach for domestic water demand modeling: An application to Kathmandu, Nepal. *Water Resources Management*, 21, 573-589.
- Bahri, A. (2011). *Hacia la gestión integrada de aguas urbanas*. Estocolmo, Suecia: Global Water Partnership.

- Baumann, D., y Boland, J. (1998). The case for managing urban water. In: Baumann, D., Boland, J., y Hanemann, W. Urban water demand management and planning (pp. 1-30). New York, USA: McGraw Hill.
- Billings, R., y Jones, C. (2008). Forecasting urban water demand (2nd ed.). Denver, USA: American Water Works Association.
- Burt, J., Barber, G., y Rigby, D. (2009). Elementary statistics for geographers (3rd ed.). New York, USA: Guilford.
- Buzai, G., y Baxendale, C. (2012). Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica. Ordenamiento territorial. Temáticas de base vectorial. 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., y 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., y 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., y 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., y Carvalho, J. (2014). Spatial determinants of urban residential water demand in Fortaleza, Brazil. *Water Resources Management*, 28, 2401-2414.
- Domene, E., y 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., y 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., y 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., Brunsdon, C., y 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., y 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., y Chang, H. (2011). Urban water demand modeling: Review of concepts, method and organizing principles. *Urban Water Research*, 47, W05401. DOI: 10.1029/2010WR009624.
- House-Peters, L., Pratt, B., y 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., y 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., y 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., y 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., y 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., y 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., y 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., y 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., y 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., y 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., y 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., y 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://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>.
- 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://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>.
- 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://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>.
- 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., y 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., y 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., y Bonnette, M. (2019). Building water-efficient cities. *Journal of the American Planning Association*, 85(4), 511-524.
- Tanverakul, S., y Lee, J. (2015). Impacts of metering on residential water use in California. *Journal of American Water Works Association*, 107(2), E69-E75.
- Tiburcio, A., y 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., y 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., y Gober, P. (2007). Determinants of small-area water consumption for the City of Phoenix, Arizona. *Water Resources Management*, 21, 1849-1863.
- Worthington, A., y Hoffman, M. (2008). An empirical survey of residential water demand modelling. *Journal of Economic Surveys*, 22(5), 842-871.

Capítulo 2. Análisis Espacial y Estimación de la Demanda Urbana de Agua en la Ciudad de México

(Versión adaptada. Texto original aceptado, en prensa: Ramos-Bueno, A. y Perevochtchikova, M. 2021. Análisis Espacial y Estimación de la Demanda Urbana de Agua en la Ciudad de México, en Judith Domínguez y Carlos López (coords.) Agua y Ciudades. CEDUA-COLMEX.

Arturo Ramos Bueno¹; María Perevochtchikova²

¹Posgrado en Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de Posgrado s/n, Del. Coyoacán, Col. Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México. Correo electrónico: arambue@gmail.com

²Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, El Colegio de México A.C., Carretera Picacho Ajusco 20, Col. Ampliación Fuentes del Pedregal, Del. Tlalpan, CP 14110, Ciudad de México. Correo electrónico: mperevochtchikova@colmex.mx

Resumen

La urbanización a nivel mundial ha sido acompañada por el aumento de los volúmenes de agua necesarios para cubrir los requerimientos que demandan las ciudades, en un contexto donde el abasto se ha vuelto cada vez más complejo en términos sociales, ambientales, políticos y económicos. Ante estos retos, ha surgido el paradigma de la Gestión Integrada del Agua Urbana que se centra en la comprensión multifacética de la demanda urbana de agua en búsqueda de su reducción; además de la integración de diferentes sectores y el cierre del ciclo del agua dentro de los principios del desarrollo sustentable. La Ciudad de México es una mega-ciudad que enfrenta varios retos con respecto a la gestión del agua; sin embargo, en los diagnósticos oficiales no se abordan los determinantes que generan la demanda urbana de agua, ni tampoco se explora su variación espacial. El presente trabajo analiza la relación entre el componente medido de la demanda urbana de agua y el ambiente urbano construido, con el fin de conocer los determinantes que la explican a nivel colonia y también dentro de las unidades territoriales del Programa de Desarrollo Urbano DF. Los resultados muestran que el centro de la ciudad es el que presenta mayores niveles de demanda de agua y es la zona prioritaria para aumentar la micromedición. La estimación realizada con datos de 2010

señala 20.86 m³/s de demanda de agua para toda la ciudad, que representa el 60% del abasto total (con un 40% de pérdidas en fugas); donde el uso no doméstico es el que presenta mayor intensidad.

Palabras clave: demanda urbana de agua; ambiente urbano construido; análisis espacial; Gestión Integrada del Agua Urbana; Ciudad de México.

1.- Introducción

Actualmente más de la mitad de la población mundial reside en zonas urbanas, sumando un total de cuatro mil millones de personas cuya distribución varía en cada una de las regiones del planeta; para el caso de América Latina el 81% de la población habita en ciudades (ONU, 2018). Este proceso de urbanización se ha visto acompañado por el aumento de la demanda de agua, que se sextuplicó durante el periodo de 1900 a 1995 (Bahri, 2011). De esta forma, se ha presentado una fuerte presión hacia las fuentes de abasto de agua potable y al mismo tiempo, el desarrollo de infraestructura hidráulica se ha vuelto cada vez más complejo en términos políticos, sociales, ambientales y económicos (Baumann y Boland, 1997; Saurí, 2013). Ante esta situación, la gestión del agua urbana ha pasado a ocupar un lugar primordial en la agenda ambiental internacional (Tiburcio y Perevochtchikova, 2012), planteando la necesidad de enfocar sus objetivos hacia la sustentabilidad de las ciudades desde el diseño sensible al agua, lo que implica equidad intergeneracional y resiliencia de los sistemas urbanos (Pinkham, 1999; Brown *et al.*, 2008).

Para enfrentar los nuevos retos generados por la contaminación y la creciente presión sobre los recursos hídricos ante el crecimiento poblacional y la expansión urbana, ha emergido el paradigma de la Gestión Integrada del Agua Urbana (GIAU); cuyo objetivo se centra en la comprensión sistémica del ciclo hídrico en las zonas urbanas, considerando no solamente los flujos naturales de entrada y de salida, sino también los múltiples factores y actores que inciden, además de la infraestructura para el abasto, el desagüe, el tratamiento y el reúso del agua que componen este ciclo metabólico (Lehmann, 2010; Bahri, 2011; Bell, 2018). De esta forma, la GIAU comprende la prestación del servicio de suministro de agua potable contemplando que la demanda de agua y el abasto son dos elementos complementarios de un mismo proceso (Bahri, 2011; Tiburcio y Perevochtchikova, 2012).

La demanda urbana de agua (DUA), por su lado, se define como el volumen necesario que requiere un organismo operador para abastecer a los usuarios en un tiempo determinado (Billings y Jones, 2008); en ella se distinguen tanto el componente medido, el agua no contabilizada y las pérdidas (Bell, 2018). Este concepto es clave para la implementación de la GIAU (Mitchell, 2006); por lo que, resulta crucial comprender sus determinantes (Bahri, 2011) para lograr la optimización del ciclo urbano del agua y evitar la sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento (Kayaga, 2011). Para esto es necesario considerar el balance entre la oferta de agua naturalmente disponible en un territorio y la demanda generada por las ciudades con sus diversos usuarios al interior (Baumann y Boland, 1997). Es por ello que la DUA se debe comprender de forma multifacética en relación a los factores socioeconómicos, ambientales y urbanos, y no solamente en términos del crecimiento poblacional (Pinkham, 1999; Mitchell, 2006).

Entre las acciones dirigidas hacia la gestión de la DUA, destacan: (1) la disminución de los flujos de agua para el abastecimiento urbano y la reducción de las pérdidas de caudales; (2) la disminución de las aguas residuales con su tratamiento; (3) la evaluación de opciones alternativas para abastecer a las ciudades, incluyendo fuentes no convencionales²; (4) la implementación de medidas para la conservación del agua; y (5) la generación de cambios a nivel administrativo (Baumann y Boland, 1997; Kayaga, 2011). Dada la complejidad de aspectos que abarca la gestión de la DUA, el interés del presente trabajo se centra en el primer punto, desarrollando un caso de estudio para una ciudad mexicana.

En la literatura internacional que se ha enfocado al estudio de los determinantes de la DUA, se pueden detectar publicaciones en las que se han propuesto y analizado estrategias para su reducción, que han sido retomadas en la toma de decisiones y en las tareas de regulación (Baumann y Boland, 1997; Mitchell, 2006; Billings y Jones, 2008; House-Peters y Chang, 2011). La mayoría de estos trabajos se han centrado en el análisis de diferentes tipos de variables socioeconómicas, en el precio por la prestación del servicio de suministro de agua potable e incluso en variables climáticas. Por otro lado, la mayor parte de estos

² Las fuentes no convencionales de agua incluyen opciones como la captación de agua de lluvia, la promoción de espacios verdes para asegurar los procesos de infiltración y de recarga, además de contemplar el tratamiento y reúso de agua como una posible fuente, tomando en cuenta la calidad necesaria según el tipo de usuario. Estas opciones van más allá de la construcción de presas para captar escurrimientos superficiales y de la extracción de agua subterránea mediante pozos (Mitchell, 2006).

estudios corresponden a ciudades europeas, de Estados Unidos y Australia (Arbués, *et al.*, 2003; Worthington y Hoffman, 2008; March y Saurí, 2009). En América Latina destacan cuatro estudios: De Maria André y Carvalho (2014) en la ciudad de Fortaleza, Brasil; Downs *et al.* (2000) y Ramos-Bueno (2016) para la Ciudad de México; y Ojeda *et al.* (2017) en la ciudad de Hermosillo, Sonora, México.

Es importante comentar que la investigación espacial para entender la DUA ha ido ganando relevancia a partir del año 2001, lo que ha permitido comprender su variación y los patrones de distribución al interior de las ciudades (House-Peters y Chang, 2011). En este tipo de análisis se ha utilizado cartografía de unidades censales o de barrios que representan una escala fina, para explorar el efecto de la contigüidad espacial y explicar la DUA, además de mostrar la existencia de patrones espaciales de alto o bajo consumo (Wentz y Gober, 2007; Chang *et al.*, 2010; House-Peters *et al.*, 2010; Shandas y Parandvash, 2010; Chang *et al.*, 2017; Stoker *et al.*, 2019). En este sentido, el análisis espacial se ha vuelto una herramienta importante para la implementación de la GIAU, ya que permite localizar los sitios en donde es pertinente realizar acciones para reducir la DUA; al mismo tiempo que sirve para abordarla de forma integral según el contexto urbano, socioeconómico y ambiental específico.

En el análisis espacial de la DUA, llama la atención que se ha explorado escasamente su relación con el ambiente urbano construido; que se define como la infraestructura urbana, que incluye el tamaño y la densidad de las viviendas, la distribución de las áreas de jardines y la edad de las estructuras construidas (Stoker *et al.*, 2019). También, March y Saurí (2009), Lehmann (2010), Saurí (2013) y Chang (2017) han planteado que la densificación urbana es un factor que tiende a reducir la cantidad de agua consumida. En este sentido, analizar la DUA considerando su relación con estos dos elementos representa una forma de integración entre las variables de desarrollo urbano y de gestión del agua (Gober *et al.*, 2013). Entre los casos de estudio que han abordado esta relación de forma espacial, destacan los siguientes:

- Área Metropolitana de Barcelona: se encontró que las viviendas ubicadas en zonas de baja densidad aumentan el uso del agua en forma anual (Domene y Saurí, 2006).
- Phoenix: se evidenció que el tamaño promedio de los predios aumenta significativamente el consumo de agua; al igual que el porcentaje de áreas con jardín

en las viviendas, la presencia de albercas y el número total de residentes (Wentz y Gober, 2007).

- Portland: se mostró que la densidad de las viviendas tiene un efecto reductor en la demanda doméstica de agua, mientras que el tamaño de los predios la aumenta (Chang *et al.*, 2010). En esta misma ciudad, se encontró que la zonificación urbana es útil para explicar el consumo de agua en forma espacial, en tanto que, la densidad resultó tener un efecto reductor al medir el número de viviendas por acre (Shandas y Parandvash, 2010).
- Estudio comparativo entre Portland, Salt Lake City, Phoenix y Austin: destacaron variables como el tamaño de las viviendas unifamiliares, su valor catastral, la edad de construcción, la superficie vegetal de los predios y la densidad de las viviendas. En términos generales, la densidad reduce el consumo de agua al igual que la edad de las construcciones. Por su parte, las otras tres variables restantes incrementan significativamente la demanda doméstica de agua (Stoker *et al.*, 2019).

En la mayoría de estos estudios se enfatiza el papel que juega la suburbanización, donde predominan las viviendas unifamiliares y la presencia de jardines, lo que implica baja densidad urbana, que a su vez se traduce en usos exteriores de agua para riego y llenado de albercas; por esta razón se ha detectado que el incremento de la densidad de vivienda es una variable importante en términos de reducción de la DUA. En América Latina no se ha abordado la DUA en relación con variables que caractericen el ambiente urbano construido, ni con la densidad urbana; sólo se ha estudiado la influencia de variables socioeconómicas.

La Ciudad de México, que es una mega-ciudad y capital nacional, enfrenta una situación compleja con respecto al sistema que la abastece de agua potable (Perevochtchikova, 2015). Particularmente, porque la infraestructura hidráulica de la que depende se encuentra operando al límite (Escolero *et al.*, 2016), sin que se conozca con certeza la cantidad de agua que se utiliza en la ciudad para diferentes usos, a la vez que hace falta un diagnóstico claro sobre los determinantes de la DUA (Ramos-Bueno, 2016). Por estas razones, el objetivo del presente trabajo es explorar de manera espacial el componente medido de la DUA en relación con algunos aspectos del ambiente urbano construido. Para lo cual, primero se realizó un análisis espacial a nivel colonia para el año 2010 (por la

disponibilidad de información). Posteriormente, se desarrolló una estimación de la DUA considerando los caudales medidos y el agua no contabilizada; el resultado se comparó con el total de agua abastecida a la ciudad para abordar el componente de las pérdidas. Estos análisis pueden servir como un insumo útil para guiar la instrumentación de acciones desde la GIAU.

2.- Usos del agua en la Ciudad de México

De acuerdo con las *Estadísticas del Agua en México* editadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), desde 1960 la población mexicana ha tendido a asentarse en ciudades sumando hoy en día 92 millones de personas, lo que representa tres cuartas partes de toda la población. En contraste, la disponibilidad nacional de agua ha disminuido en el tiempo y actualmente se cuenta con un promedio anual de 3,656 m³ por habitante. La distribución espacial y temporal de esta disponibilidad de agua varía en el territorio, pero el caso más crítico es la Región Hidrológico-Administrativa XIII “Agua del Valle de México” con tan sólo 144 m³ por habitante al año. En esta Región se ubica la Ciudad de México (CDMX), el principal centro político, económico y administrativo del país, en donde residen 8.81 millones de personas y se genera el 16.97% del PIB nacional (CONAGUA, 2018).

Para cubrir las necesidades de agua que requiere la población de la CDMX, se han construido varios sistemas de abasto que vinculan artificialmente tres cuencas (Cuenca de México, Lerma y Cutzamala), además de las obras para el drenaje hacia la cuenca del río Tula; toda esta infraestructura se ha constituido como un sistema regional (Perló y González, 2009). De acuerdo con Tiburcio y Perevochtchikova (2012), el caso de la capital mexicana es un ejemplo de una “ciudad drenada” según el esquema expuesto por Brown *et al.* (2008:5). Este planteamiento se fundamenta en que la concepción, construcción y operación de la infraestructura hidráulica se ha realizado considerando solamente el factor de desarrollo económico, además de entender la DUA únicamente en relación directa con el crecimiento poblacional. Este caso muestra una falta de visión integrada de la gestión del agua, que se pretende modificar a través de los principios de la GIAU (Perevochtchikova, 2015).

A pesar de todas las obras que se han construido para abastecer de agua a la Ciudad de México, Morales y Rodríguez (2009:28) plantean la existencia de un déficit de 39.48

m³/hab/año que resulta de la diferencia entre los 125.28 m³/hab/año de agua concesionada³ con que cuenta la ciudad, en comparación con los 85.8 m³/hab/año de agua renovable. Según estos autores, este déficit de agua se cubre mediante suministro intermitente en cantidad y calidad, lo que ocasiona un acceso desigual al agua caracterizado por una dinámica espacial diferenciada en la ciudad (Jiménez *et al.*, 2011).

Otro de los temas relevantes de la gestión del agua en la CDMX, es la falta de cobertura universal de micromedición. Esta situación prevalece a pesar de los esfuerzos que se realizaron desde los años 90 para ampliar el padrón de usuarios y conocer la DUA total de la ciudad, con el fin de lograr una gestión más eficiente (Martínez, 2004). Actualmente, el caudal resultante de la micromedición representa alrededor de una tercera parte del total de agua abastecida proveniente de varias fuentes (Ramos-Bueno, 2016:77). La diferencia entre este caudal medido y el total suministrado refiere a una pérdida de aproximadamente un 40%; lo que se refleja en una dotación promedio de 303 litros/hab/día equivalente a un consumo efectivo de 180 litros/hab/día (SACMEX, 2019:62).

La Ley de Aguas del Distrito Federal es el instrumento jurídico que regula la gestión del agua en forma local, establece que el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) es un organismo operador desconcentrado de la administración pública, adscrito a la Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX, encargado de la operación de la infraestructura hidráulica, la prestación de los servicios públicos de agua potable, drenaje y alcantarillado, además del tratamiento y el reuso de las aguas residuales (ALDF, 2003). En esta ley se define a los usuarios del agua como las personas físicas o morales que hacen uso de los servicios hidráulicos que presta esta institución; de acuerdo con ALDF (2003) y GCDMX (2016a) existen tres tipos de uso del agua que se definen de la siguiente manera:

³ La publicación original menciona esta cifra como “Consumo de agua de primer uso por habitante” sin embargo, este cálculo se realizó tomando como referencia la información publicada en el Registro Público de Derechos del Agua (disponible en: <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>). Esta fuente corresponde a las concesiones y asignaciones que otorga la CONAGUA a los usuarios del agua a nivel federal y no tienen relación directa con la micromedición dentro la Ciudad de México a cargo del SACMEX. Por esta razón, en el texto se hace mención al agua concesionada y no al agua consumida para distinguirla del objeto de estudio que se aborda en este trabajo.

- Uso Doméstico: hace referencia a las tomas instaladas en inmuebles de tipo habitacional, siempre y cuando el agua suministrada no se utilice en actividades lucrativas.
- Uso No Doméstico: contempla las tomas instaladas en establecimientos comerciales, industriales y de servicios.
- Uso Mixto: comprende las tomas instaladas en inmuebles que tienen conjuntamente usos habitacionales y no habitacionales, o cuando se trata de un inmueble con dos o más usos no habitacionales.

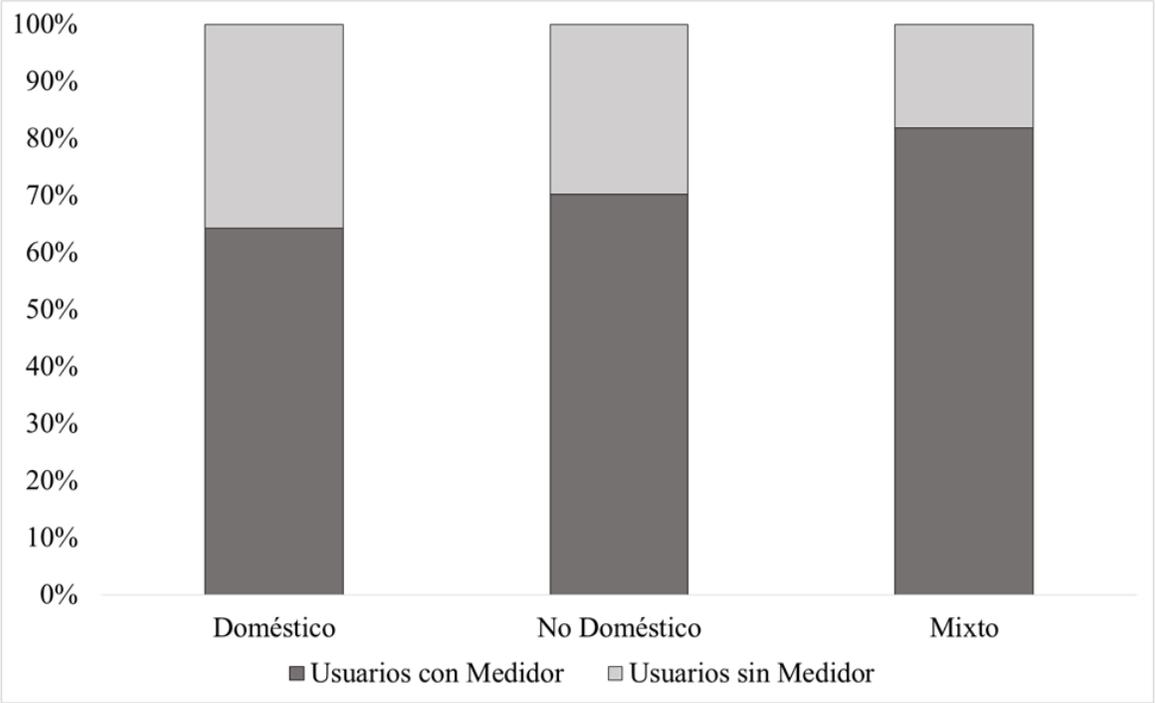
Estos tres usos del agua comprenden la DUA de la CDMX, sin embargo dada la falta de cobertura universal de micromedición, una parte representa el componente medido y la otra el agua no contabilizada según la distinción que se hace en Bell (2018). De acuerdo con las bases de datos de SACMEX (2014), la cobertura de micromedición para los tres usos del agua en la CDMX durante el año 2010, representó un 65.86% del total de usuarios. Durante este año se registraron 2,022,222 usuarios, de los cuales 86.36% eran de uso doméstico, 6.77% de uso no doméstico y 6.86% de uso mixto. La Figura 1 muestra la cobertura de micromedición por tipo de usuario, donde se aprecia que el uso doméstico es el que cuenta con la menor cobertura de micromedición de los tres usos, al tiempo que representa la mayor parte del padrón. Por su parte, los otros dos usos restantes son los que cuentan con mejores niveles de micromedición.

En los programas locales de gestión del agua se menciona como un objetivo estratégico la disminución del consumo excesivo de agua; sin embargo, no se plantean los posibles determinantes que lo generan (GDF, 2012; GCDMX, 2016b; SACMEX, 2019). Adicionalmente, falta un diagnóstico con abordaje espacial que evidencie las diferencias de consumo entre las distintas zonas de la ciudad (Ramos-Bueno, 2016).

En este sentido, en el trabajo de Downs *et al.* (2000) se presenta una estimación de la demanda de agua para uso doméstico, agrícola, industrial, comercial y de servicios, además de la requerida para la generación de energía eléctrica y las pérdidas de caudales en toda la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Particularmente, para la demanda de agua por uso doméstico, se desarrolló una modelación de crecimiento poblacional y se asignó un factor *per cápita* de uso del agua basado en algunas características socioeconómicas de la

delegación⁴ Miguel Hidalgo, reportadas por la DGCOH⁵. La demanda industrial de agua se modeló en función de las unidades productivas de nueve subsectores diferentes y para la estimación de la demanda comercial se utilizó el total de la población empleada en ocho subsectores, la cual fue multiplicada por un factor *per cápita* de consumo por empleado que osciló entre los 30 y 100 litros por persona al día⁶.

Figura 1 Usuarios del agua en la Ciudad de México, 2010.



Fuente: elaboración propia con datos del SACMEX, obtenidos vía transparencia, (SACMEX, 2014).

Los resultados publicados por Downs *et al.* (2000) representan un primer acercamiento para comprender el tema del abasto de agua en la ciudad desde una visión centrada en la demanda. Pese a que se maneja una escala espacial de análisis que contempla las delegaciones (ahora alcaldías) y los municipios de la ZMCM no se realizó ningún análisis

⁴ Este estudio se realizó antes de la reforma constitucional del año 2016, por lo que se hace referencia a las delegaciones del Distrito Federal.

⁵ Dirección General de Operación Hidráulica. Esta institución estaba a cargo de la gestión del agua junto con la Comisión de Aguas del Distrito Federal, hasta antes de la fundación del SACMEX en el año 2003.

⁶ Para mayor referencia sobre los factores utilizados en estas estimaciones se debe revisar Downs, et al (2000:2326-2327)

espacial, además no se utilizaron datos empíricos derivados de la micromedición, ni se buscaron determinantes explicativos de la DUA. Cabe destacar que la estimación para el año 2015 de la demanda de agua para la Ciudad de México estuvo en un rango de 24.4 a 31.4 m³/s (Downs *et al.*, 2000). Paralelamente, el SACMEX estimó que 22.3 m³/s de agua son los que se entregan efectivamente a los usuarios, una vez descontados los caudales perdidos en fugas (GDF, 2007:13). Con esta comparación, se aprecia la similitud de los resultados pero queda pendiente abordar la relación entre la DUA con el ambiente urbano construido desde una visión espacial, además de localizar las diferencias de consumo de agua al interior de la ciudad.

En este sentido, el estudio de Ramos-Bueno (2016) presenta un primer análisis espacial a nivel colonia para el uso doméstico de agua, en donde se destaca el papel de las variables socioeconómicas explicativas (en forma bruta y en términos *per cápita*). Como resultado de este análisis para el año 2010, se identificaron valores altos en la zona centro y oriente de la ciudad en términos brutos; en contraste los valores altos de uso *per cápita* que se agruparon en las colonias ubicadas en el centro y en el poniente. Es importante resaltar que en este estudio no se abordaron los otros dos usos del agua regulados por el SACMEX, ni tampoco se exploraron variables relacionadas con el ambiente urbano construido.

Para comenzar a plantear la integración entre la DUA y el ambiente urbano construido, es preciso explorar los instrumentos legales tanto del sector hídrico (expuesto antes), como del urbano. En esta línea, desde el año 2003 se encuentra vigente el Programa General de Desarrollo Urbano del Distrito Federal (PGDUDF) referenciado en GDF (2003), que entre sus estrategias plantea el desarrollo urbano intensivo vertical para revertir la expansión territorial del área urbana. Como parte del diagnóstico que presenta, se menciona que a partir de los años 1980 las áreas centrales de la ciudad han ido perdiendo población, que ha migrado hacia las periferias y a los municipios conurbados de la ZMCM.

Las estrategias planteadas en el PGDUDF contemplan cuatro unidades territoriales en las que se dividió la CDMX (Figura 2). Para su delimitación se tomaron en cuenta los límites político-administrativos de las alcaldías, además de la delimitación entre el área urbana y el Suelo de Conservación según el Programa General de Ordenamiento Ecológico

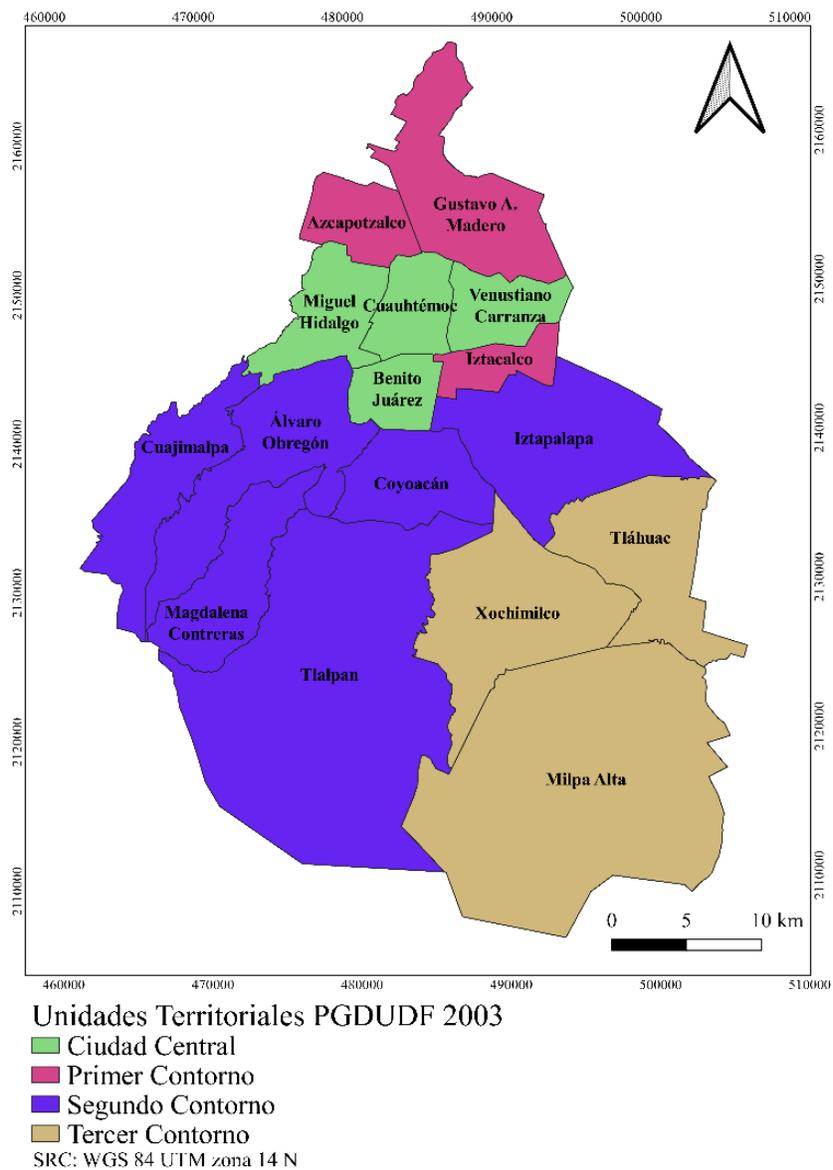
del Distrito Federal, publicado en el año 2000. A continuación se mencionan algunos puntos relevantes sobre cada una de estas cuatro unidades, como aparece en GDF (2003:76-77):

- Ciudad Central: comprende lo que fue el primer casco urbano de la CDMX, en donde se realizan las actividades comerciales y de servicios más importantes de la ciudad. La infraestructura básica y el equipamiento urbano se consideran subutilizados. Entre las estrategias planteadas están el mejoramiento urbano, el reciclamiento, la conservación patrimonial y el desarrollo vinculado a los usos habitacional y mixto.
- Primer Contorno: se caracteriza por contar con infraestructura vial y por la presencia de la principal actividad industrial de la ciudad. Las políticas para este contorno deben orientarse hacia potenciar el aprovechamiento del suelo en sus diversos usos y dar prioridad al uso habitacional e industrial.
- Segundo Contorno: se posiciona como intermedio entre la Ciudad Central y las alcaldías que están en la periferia. Presenta carencias en cuanto a infraestructura, vialidad y equipamiento. La regulación de los usos de suelo debe enfocarse a evitar el crecimiento del suelo urbano en zonas de alto valor ambiental.
- Tercer Contorno: esta unidad territorial está compuesta en su mayoría por el Suelo de Conservación, que se considera como garante de la sustentabilidad ambiental. En ella se localizan los poblados rurales de la ciudad, por lo que el desarrollo debe enfocarse en la conservación patrimonial y en el mejoramiento urbano, además de impulsar las actividades primarias y aplicar medidas para retener el crecimiento urbano.

A partir de los puntos expuestos, se propone en el presente trabajo abordar dos de los principios de la GIAU. El primero de ellos es la comprensión multifacética del componente medido de la DUA, a través de una caracterización del ambiente urbano construido como determinante de los usos doméstico, no doméstico y mixto de agua a nivel colonia con datos correspondientes al año 2010. El segundo principio, es el que enfatiza la coordinación entre los instrumentos de gestión del agua y de uso del suelo, por lo que, los resultados del análisis espacial a nivel colonia se agruparon en las unidades territoriales del PGDUDF para mostrar la convergencia entre ambos sectores y localizar los sitios en donde puede darse la coordinación. La importancia de estos principios radica en generar insumos para la toma de

decisiones, enfocada hacia la reducción de la DUA, mediante la ubicación de las colonias prioritarias en donde sea posible plantear estrategias de manera local.

Figura 2 Alcaldías que componen las Unidades Territoriales del PGDUDF.



Fuente: Elaboración propia con base en (GDF, 2003:66-67).

3.- Metodología

Para la construcción de las bases de datos, se solicitó a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la CDMX una capa en formato *shapefile* con 1,456 colonias que conforman la

ciudad (SEDUVI, 2015). En ella se georreferenciaron los datos de usuarios con medidor (micromedición) y los tres usos del agua que se definen en ALDF (2003) y GCDMX (2016a). Esta información fue aportada por el SACMEX mediante su portal de transparencia (SACMEX, 2014; 2015). Posteriormente, se descargó de la Biblioteca digital de mapas del INEGI, en el Tema “Marcos Geoestadísticos Urbanos y Rurales” la colección llamada “*Información Vectorial de Localidades Amanzanas y Números Exteriores, Urbanas*” para todas las localidades de la Ciudad de México (INEGI, 2010), disponible en <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>. Estos datos corresponden al Marco Geostadístico Nacional del Censo 2010. Finalmente se descargaron los datos de uso de suelo de la SEDUVI (2019) desde el portal de Datos Abiertos de la CDMX, disponible en <https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/uo-de-suelo/table/>.

Se analizó el componente medido de la DUA por separado como lo sugieren Billings y Jones (2008); por esta razón, se realizaron tres Análisis Locales de Indicadores de Asociación Espacial (LISA) para cada uno de los usos del agua a nivel colonia. Se midió la I de Moran mediante un análisis de autocorrelación univariada con 999 permutaciones (Buzai y Baxendale, 2012). Este estadístico permite detectar patrones espaciales estadísticamente significativos, que a través del análisis LISA se pueden cartografiar para ubicar la agrupación de colonias con alto o bajo consumo de agua (Anselin, 2005). Los pesos espaciales se calcularon mediante una matriz de contigüidad de *Queen*, que toma en cuenta los vértices y los lados de las unidades espaciales como vecinos (Chang *et al.*, 2017).

Para los tres análisis se excluyeron las colonias que no cuentan con micromedición, al igual que aquellas que reportaron consumo cero de agua. Se trabajó con un total de 1,340 colonias en el caso del uso doméstico de agua; 1,310 para el uso no doméstico y 1,292 para el uso mixto. La colonia como unidad espacial de análisis representa una escala fina, en donde el ambiente urbano construido muestra una menor heterogeneidad en comparación con las alcaldías.

La relación entre el ambiente urbano construido y el componente medido de la DUA se analizó a partir de tres modelos de regresión múltiple de mínimos cuadrados. Los tres modelos se desarrollaron en una forma log-log que permite interpretar los coeficientes resultantes como elasticidades de la demanda de agua, haciéndolos comparables entre sí y

normalizando las variables bajo estudio (Billings y Jones, 2008; Stoker *et al.*, 2019). Estos modelos se especifican de la siguiente manera (Ecuación 1):

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

En la Ecuación 1 (y) corresponde a la variable dependiente y (x) a las variables independientes o explicativas, por su parte (ε) es el término de error. A partir de este método se estiman los coeficientes beta (β), que representan la magnitud en la que varía la variable dependiente en función de cada una de las variables independientes (Burt *et al.*, 2009). En este caso, los modelos tuvieron como variable dependiente (y) los tres usos del agua, medidos en metros cúbicos anuales para el año 2010. Se contó con un total de once variables independientes (x) que describen tres rubros característicos de la CDMX: (1) la falta de cobertura universal de micromedición del agua, (2) la caracterización del ambiente urbano construido y (3) el acceso al agua. La Tabla 1 muestra las variables independientes que se consideraron para el análisis agrupadas por rubro; se da una breve descripción de cada una, acompañada por las unidades de medición y por las fuentes de donde se obtuvo la información.

Tabla 1 Variables independientes utilizadas para el análisis de regresión múltiple de mínimos cuadrados del componente medido de la DUA en las colonias de la Ciudad de México.

Rubro	Variable	Descripción	Unidades	Fuente de información
Control	Micromedición	Se denomina variable control dada la falta de cobertura universal en la ciudad. Su coeficiente beta permite estimar el caudal de agua no contabilizada.	Porcentaje de usuarios con medidor (%)	SACMEX (2014)
Ambiente urbano construido	Conjuntos habitacionales	Agrupación de viviendas planificada y dispuesta en forma integral con un equipamiento comunitario y social básico, e instalaciones necesarias y adecuadas de servicios urbanos.	Total de predios por colonia	INEGI (2010, 2018)

	Edificios	Construcciones de materiales resistentes conformadas por varios niveles, destinadas para el desarrollo de diferentes actividades humanas con diversos giros.	Total de predios por colonia	INEGI (2010, 2018)
	Establecimientos	Unidades económicas en una sola ubicación física, asentadas de manera permanente, en donde se combinan acciones y recursos bajo el control de una sola entidad propietaria, para realizar actividades de producción de bienes, compra-venta de mercancías o prestación de servicios, ya sea con fines mercantiles o no.	Total de predios por colonia	INEGI (2010, 2018)
	Otros domicilios	Valor que se asigna a los predios cuyas características no están comprendidas en el resto de las categorías.	Total de predios por colonia	INEGI (2010, 2018)
	Servicios	Áreas verdes, cementerios, centros de asistencia médica, escuelas, mercados, palacios de gobierno, plazas y templos según el Marco Geoestadístico Nacional.	Total de predios por colonia	INEGI (2010, 2018)
	Viviendas	Unidades delimitadas por paredes y cubiertas por techos, con entrada independiente, donde generalmente las personas comen, preparan alimentos, duermen y se protegen del ambiente.	Total de predios por colonia	INEGI (2010, 2018)
	Viviendas con actividad económica	Se refiere a las viviendas en donde, además del uso habitacional, se realiza alguna actividad económica establecida.	Total de predios por colonia	INEGI (2010, 2018)
	Densidad de predios	Total de predios por hectárea en las colonias de la CDMX.	Predios/ha	INEGI (2010), SEDUVI (2015)
	Superficie de predios	Superficie total de los predios en las colonias de la CDMX.	Hectáreas	SEDUVI (2019)

Acceso	Tandeo (TA)	Se refiere al suministro intermitente de agua que reciben las colonias, según el listado que aparece en la <i>Gaceta Oficial de la CDMX</i> . La variable se midió de forma categórica.	Colonias con tandeo 1 Colonias sin tandeo 0	GDF (2010)
--------	-------------	---	--	------------

Nota: elaboración propia, la selección de variables para caracterizar estos tres rubros se realizó con base en Martínez (2004); GDF (2012, 2016) y SACMEX (2019) para la variable control. Wentz y Gober (2007); Shandas y Parandvash (2010); Chang et al. (2017) y Stoker et al. (2019) para el ambiente urbano construido. Finalmente, Jiménez *et al.* (2011) para el acceso al agua.

Una vez obtenidos los coeficientes beta (β) de las variables indicadas en la Tabla 1, se compararon los datos de SACMEX (2014) con los pronosticados por los tres modelos de regresión múltiple de mínimos cuadrados. Con estos coeficientes se calculó la cantidad de agua no contabilizada, tomando como referencia el porcentaje de usuarios que carecen de medidor para la variable control. Posteriormente, se sumaron las cantidades de agua no contabilizada y pronosticada para obtener la estimación de la DUA en la CDMX para el año 2010. Por su parte, el componente de pérdidas se abordó mediante la comparación de la DUA estimada con el abasto total de agua según SACMEX (2015). La estimación de la DUA también permitió calcular las intensidades de cada uno de los tres usos del agua, expresadas en litros por usuario al día y agrupadas en las unidades territoriales que establece el PGDUDF.

4.- Resultados

4.1 Análisis Locales de Indicadores de Asociación Espacial para la demanda urbana de agua en las colonias de la Ciudad de México

Como resultado del análisis realizado, los tres usos de agua en la CDMX y el porcentaje promedio de usuarios con medidor presentan una distribución espacial diferenciada, tal como se aprecia en la Tabla 2 para las cuatro unidades territoriales de la ciudad.

Tabla 2 Características de los tres usos de agua por unidad territorial del PGDUDF.

Unidad Territorial PGDUDF (2003)	Uso doméstico (millones de m³/año)	Promedio de usuarios domésticos con medidor (%)	Uso no doméstico (millones de m³/año)	Promedio de usuarios no domésticos con medidor (%)	Uso mixto (millones de m³/año)	Promedio de usuarios mixtos con medidor (%)
Ciudad Central	84.94	58.34	36.09	73.79	16.04	94.82
Primer Contorno	71.76	75.15	13.60	79.29	9.94	90.34
Segundo Contorno	138.09	74.80	24.80	71.85	13.10	83.83
Tercer Contorno	18.25	60.67	3.10	69.17	1.82	67.78
CDMX	313.04	67.24	77.59	73.52	40.91	84.19

Fuente: elaboración propia con base en GDF (2003), INEGI (2010) y SACMEX (2014).

Destaca que el Primer Contorno es el que cuenta con el mayor porcentaje de usuarios con medidor doméstico, en tanto que la Ciudad Central y el Tercer Contorno muestran niveles de micromedición por debajo del promedio. El Segundo Contorno es el que presenta el valor más alto para el uso doméstico de agua, seguido por la Ciudad Central que se caracteriza por contar con la micromedición más baja de las cuatro unidades territoriales. En cuanto al uso no doméstico el valor más alto se localiza en la Ciudad Central, seguido por el Segundo Contorno. En el caso de este uso, tanto el Primer Contorno como la Ciudad Central, tienen niveles de micromedición por encima del promedio. El uso mixto de agua es el que presenta mejores niveles de micromedición; solamente el Tercer Contorno está por debajo del promedio. De forma similar al uso no doméstico, la Ciudad Central y el Segundo Contorno son los que tienen los niveles más altos de consumo.

El valor de la I de Moran obtenido para la distribución espacial del uso doméstico fue de 0.38, lo que indica que hay colonias agrupadas donde la demanda de agua presenta valores similares entre sí. Por su parte, las distribuciones espaciales de los usos no doméstico y mixto tuvieron valores para la I de Moran de 0.38 y de 0.35, respectivamente. En los tres casos, las distribuciones espaciales presentan patrones de agregación moderados. En la Figura 3 se muestran los resultados de los análisis LISA, en color gris oscuro aparecen las colonias con valores altos para el componente medido de la DUA, mientras que los valores bajos tienen

un achurado de puntos. Las colonias se enmarcaron según las unidades territoriales del PGDUDF.

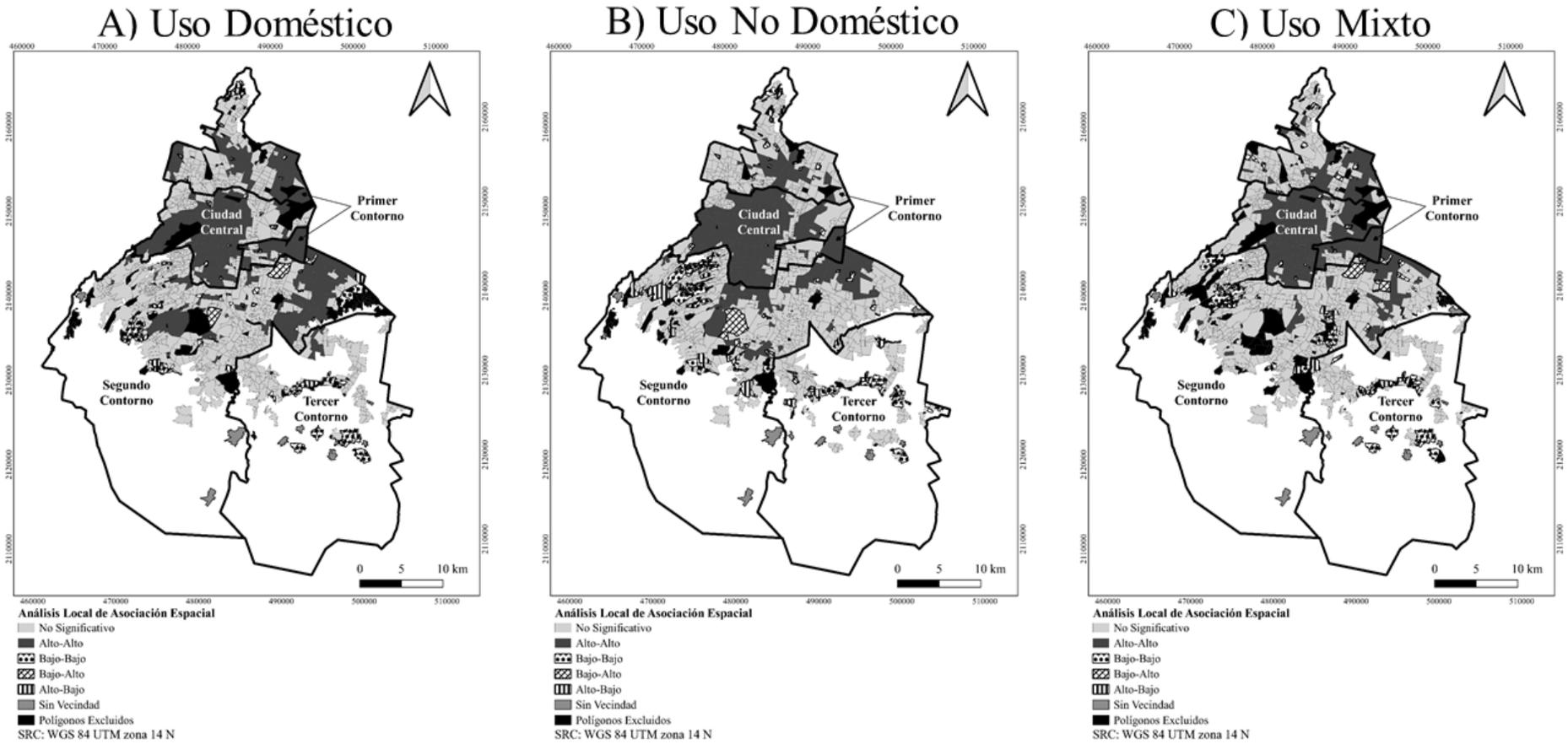
Varias de las colonias ubicadas en la Ciudad Central aparecen con valores altos para los tres usos del agua. Se observa un grupo importante de colonias con valores altos localizadas al oriente del Primer y del Segundo Contorno, y en menor medida aparecen algunas colonias en esta situación en el sur-poniente del Segundo Contorno. Por su parte, el Tercer Contorno sólo cuenta con pocas colonias que muestran valores altos para el uso doméstico de agua, mientras que el resto son colonias que presentan valores bajos para los tres usos.

4.2 Análisis multivariado del componente medido de la DUA en relación con el ambiente urbano construido

La caracterización del ambiente urbano construido se muestra en la Tabla 3, agrupada por unidad territorial del PGDUDF. El mayor tipo de predios registrados son las viviendas, seguidas por las viviendas con actividad económica, otros domicilios, establecimientos, edificios, conjuntos habitacionales y servicios. Los edificios y los establecimientos se encuentran asentados mayormente en la Ciudad Central, mientras que el Segundo Contorno es el que tiene la mayor parte de los predios restantes.

Con respecto a la densidad urbana promedio, el Primer Contorno es el que muestra mayor cantidad de predios por hectárea, en contraste con el Tercer Contorno y la Ciudad Central que resultan ser las unidades menos densas. La superficie promedio de los predios muestra su valor más alto en la Ciudad Central y el más bajo en el Tercer Contorno, lo que sugiere una relación entre el tamaño de los predios en función de su distancia con del centro. En cuanto al Tandeo, la Ciudad Central no tiene colonias registradas en la *Gaceta Oficial CDMX* (GDF, 2010) para este tipo de suministro; en contraste con el Segundo Contorno que agrupa el mayor número de colonias con esta condición.

Figura 3 Análisis Local de Asociación Espacial para las distribuciones espaciales de los tres usos de agua en la Ciudad de México.



Fuente: elaboración propia con datos de SACMEX (2014).

Tabla 3 Caracterización del ambiente urbano construido por unidad territorial PGDUDF en la Ciudad de México.

Unidad Territorial	Ciudad Central	Primer Contorno	Segundo Contorno	Tercer Contorno	CDMX
Total de Conjuntos Habitacionales	4,280	2,110	6,019	551	12,960
Total de Edificios	29,747	10,117	14,734	1,826	56,424
Total de Establecimientos	27,415	12,264	18,137	3,064	60,880
Total de Otros domicilios	11,817	13,770	43,864	10,072	79,523
Total de Servicios	2,594	2,067	4,027	907	9,595
Total de Viviendas	119,745	230,843	515,382	103,604	969,574
Total de Viviendas con Actividad Económica	15,000	25,383	46,794	13,341	100,518
Densidad promedio de predios por hectárea	19.98	27.04	26.44	19.11	23
Superficie promedio de Predios (hectáreas)	37.10	30.11	27.67	26.83	30
Colonias Abastecidas por Tandeo	-	25	101	10	136

Fuente: elaboración propia con datos de GDF (2010), INEGI (2010) y SEDUVI (2019).

Las estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en los modelos de regresión múltiple de mínimos cuadrados se encuentran en el Anexo 1 en forma logarítmica, mientras que los resultados de estos análisis aparecen en la Tabla 4, donde se indican los coeficientes de las variables que resultaron significativas al 95% para cada uno de los tres usos de agua. También se muestran los estadísticos de la (t) de Student, así como su nivel de significancia, los valores de R^2 y el Akaike Information Criterion (AIC) para cada uno de los modelos. En el Anexo 2 aparece una explicación de la información que brindan estos estadísticos, así como las ecuaciones resultantes de los modelos.

Tabla 4 Coeficientes beta (β) estimados por medio del análisis de regresión múltiple de mínimos cuadrados para los usos doméstico, no doméstico y mixto que conforman el componente medido de la DUA en la Ciudad de México.

Rubro	Variable	Uso Doméstico	Uso No Doméstico	Uso Mixto
		Constante	3.882 (28.71) ***	10.038 (28.18) ***
Control	Micromedición (MC)	1.000 (44.69) ***	-0.342 (-4.48) ***	0.378 (10.95) ***
Ambiente urbano construido	Conjuntos habitacionales (CH)	0.134 (7.81) ***		
	Edificios (ED)	0.270 (19.83) ***	0.21 (9.36) ***	0.163 (8.53) ***
	Establecimientos (ES)		0.54 (18.19) ***	0.321 (12.51) ***
	Otros domicilios (OD)			-0.211 (-8.30) ***
	Servicios (SR)	0.103 (3.54) ***	0.51 (13.26) ***	0.207 (5.56) ***
	Viviendas (VI)	0.357 (17.86) ***		0.221 (6.47) ***
	Viviendas con actividad económica (VE)			0.429 (16.02) ***
	Densidad de predios (DN)		-0.59 (-14.77) ***	
	Superficie de predios (SP)	0.216 (9.00) ***		
Acceso al agua	Tandeo (TA)	-0.193 (-2.69) **		0.327 (3.73) ***
R ²		0.82	0.66	0.70
AIC		2771.55	3898.2	3270.09
n		1340	1310	1292

Nota: ** Valor de p = 0.01 ***Valor de p = 0.001

A partir de la Tabla 4, la micromedición es la variable que muestra el coeficiente con mayor magnitud para explicar el uso doméstico; su interpretación plantea que el aumento de 1% en la cantidad de medidores se reflejará en un incremento de 1% del agua requerida para este uso. El siguiente coeficiente con mayor magnitud es el de viviendas, seguido por el de los edificios, cuyas elasticidades muestran que aumentar en 1% este tipo de predios causa un incremento de 0.357% y 0.270% en el uso doméstico anual, respectivamente. Es preciso mencionar que la superficie total de los predios resultó significativa y con signo positivo, mostrando que un aumento del 1% representa 0.216% adicional de agua para el uso doméstico.

Por otro lado, el tandeo apareció con un signo negativo y con una significancia más baja que el resto de las variables; este resultado muestra que esta condición de suministro intermitente reduce alrededor de un 20% el uso doméstico. Esta interpretación es distinta al resto de los coeficientes por la forma en cómo se midió esta variable, de manera categórica

como cero o uno. Finalmente, los conjuntos habitacionales y los predios de servicios son las variables que poseen los coeficientes con menor magnitud y muestran signos positivos.

En el caso del uso no doméstico, el coeficiente con mayor magnitud fue la densidad de predios que presenta un signo negativo; esto indica que aumentar en 1% la cantidad de predios por hectárea disminuye este tipo de uso del agua en casi 0.6%. Los coeficientes de los predios de servicios y de establecimientos mostraron magnitudes muy similares entre sí, además de vincularse directamente a la definición del uso no doméstico, ya que, en ambos casos se trata de predios y de usuarios de agua que no son de tipo habitacional. La micromedición posee signo negativo, lo que indica una reducción de la demanda al aumentar el porcentaje de medidores, esto puede ocurrir como efecto de los esquemas tarifarios basados en el servicio medido. El modelo mostró el valor de R^2 más bajo, lo que significa que este uso de agua es el que cuenta con menor explicación en función de las variables seleccionadas.

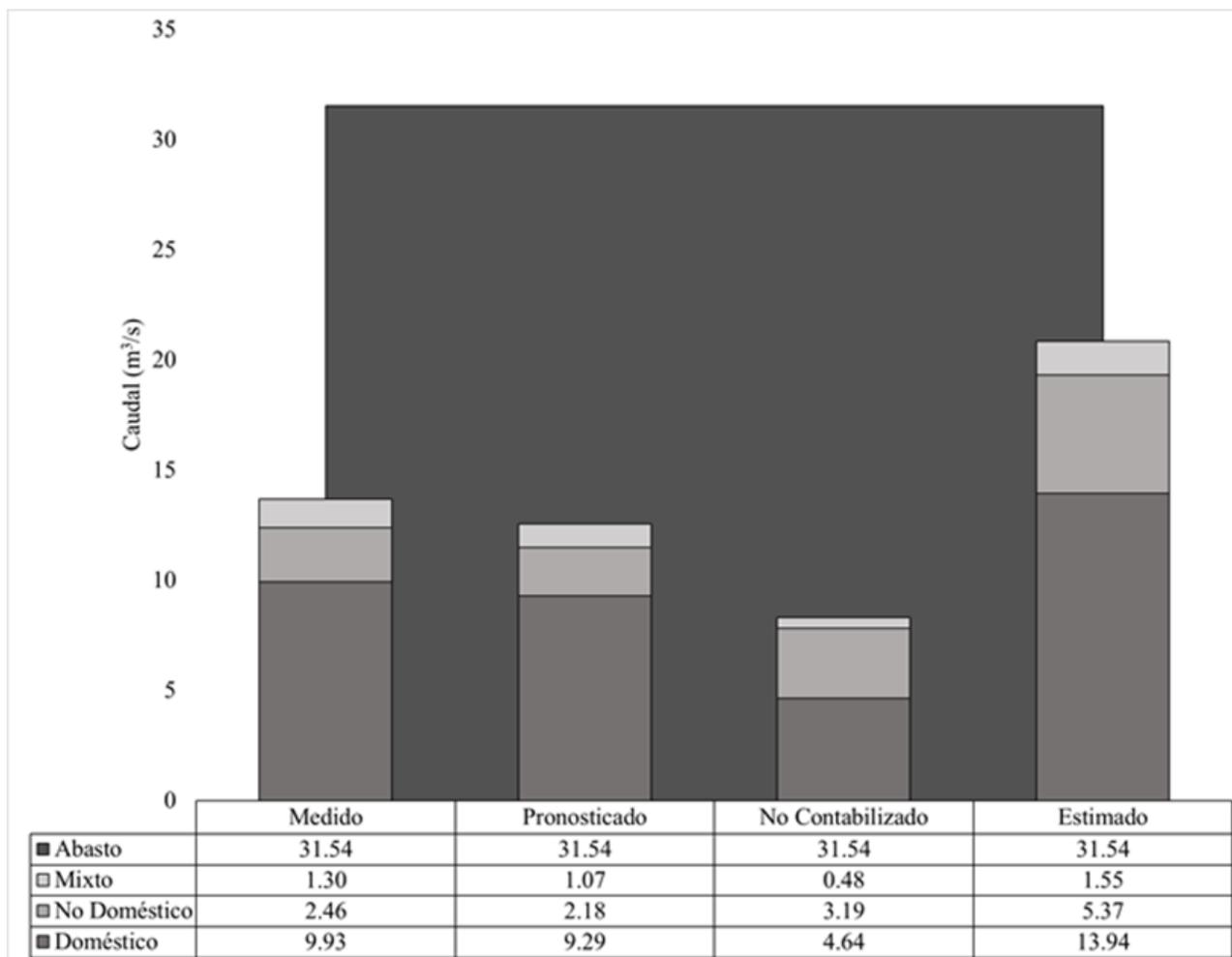
Por la parte del uso mixto, el coeficiente que mostró mayor magnitud fue el porcentaje de viviendas con actividad económica, seguidas por la micromedición. En el caso de este modelo, el tandeo presenta signo positivo y también muestra el valor más bajo para la t de Student. Los predios denominados como “Otros domicilios” aparecen con signo negativo, lo que implica una reducción del uso mixto a causa de esta variable que contrasta con los predios destinados a servicios, cuyo coeficiente tiene una magnitud similar, aunque con signo positivo. Finalmente, los edificios son los que mostraron menor contribución para explicar este uso de agua.

4.3 Estimación de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México

En la Figura 4 aparecen los resultados de la estimación de la DUA en la CDMX. La primera columna muestra los datos que se utilizaron para calcular los modelos de regresión múltiple de mínimos cuadrados. En la segunda columna, está el pronóstico que genera cada uno de estos modelos y en la tercera columna se muestra el resultado de aplicar los coeficientes beta de los modelos de regresión, con los usuarios que carecen de medidor. De esta forma se calculó el caudal de agua no contabilizada. La cuarta columna corresponde a la estimación

de la DUA para toda la ciudad, cuyo resultado fue de 20.86 m³/s equivalente al 66.13% del total abastecido, que en suma serían 31.54 m³/s.

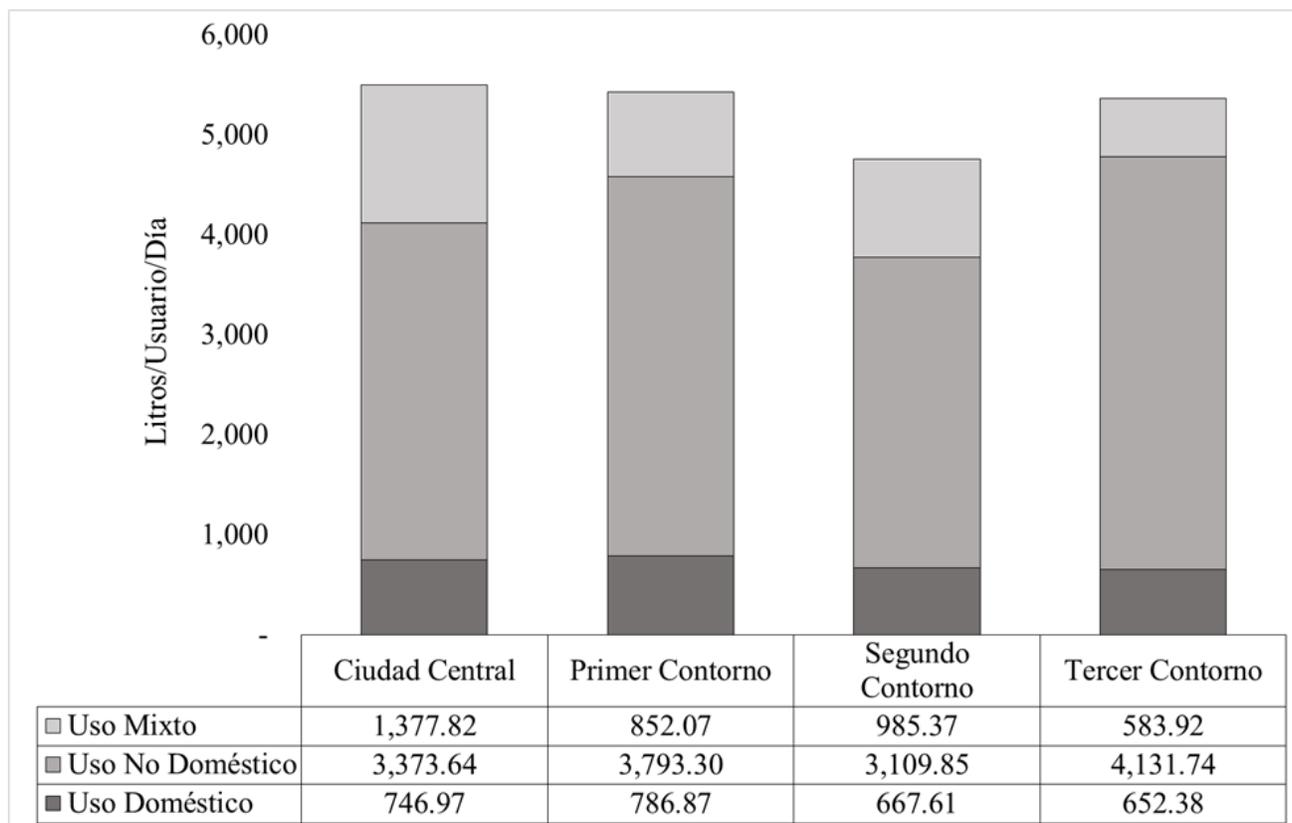
Figura 4 Estimación de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México, en comparación con el caudal abastecido.



La Figura 5 muestra la intensidad (litros/usuario/día) para cada uno de los usos del agua que componen la DUA en las cuatro unidades territoriales del PGDUDF; donde se observa que el uso no doméstico es el más intenso. Con respecto a este uso, el Tercer Contorno es el que muestra el valor más alto, seguido del Primer Contorno, la Ciudad Central y finalmente el Segundo Contorno. Para el caso del uso mixto, destacan la Ciudad Central y el Segundo Contorno, mientras que el uso doméstico tiene su mayor valor en el Primer

Contorno seguido de la Ciudad Central, aunque no presenta tanta variación como en los otros dos casos.

Figura 5 Intensidad de los tres usos del agua que componen la DUA (litros/usuario/día) en las unidades territoriales del PGDUDF (GDF, 2003).



A partir de este análisis, destaca la relevancia de analizar el tipo de actividades económicas relacionadas con el uso no doméstico de agua y su localización. En este sentido, destaca el Tercer Contorno por exhibir la mayor intensidad de uso no doméstico del agua, además de ser una unidad territorial caracterizada por un bajo nivel de micromedición y también por baja densidad de predios. Estas dos características pueden ser las que contribuyan a este resultado en términos de los coeficientes mostrados en la Tabla 4. Es importante enfocar más esfuerzos de investigación en esta zona, debido a su rol clave en la sustentabilidad ambiental de la CDMX.

5.- Comentarios finales

El ambiente urbano construido tiene diferentes efectos sobre cada uno de los tres usos del agua que componen la DUA a nivel colonia en la CDMX, así como en las delimitaciones territoriales del PGDUDF. Parte de este argumento se evidencia a través del papel que juega la densidad urbana en relación con el uso no doméstico, al mostrar un coeficiente beta con signo negativo. Este resultado sugiere que el incremento de la densidad urbana puede reducir el uso no doméstico de agua, sobre todo cuando se trata del uso de agua más intenso en toda la ciudad. En este sentido y en términos espaciales, las zonas prioritarias para atender serían el Tercer y el Primer Contorno, por lo que es preciso explorar la relación entre los tipos de actividad económica y el tamaño de los establecimientos, según el personal ocupado para identificar el sector económico con el uso de agua más intenso.

La superficie total de los predios y su relación con el uso doméstico de agua es un punto importante para resaltar la unión entre el desarrollo urbano y la gestión del agua, dado que los predios de la Ciudad Central son más grandes que en resto de las unidades territoriales. A esto se debe agregar que esta zona se caracteriza por presentar valores altos de consumo, lo que puede deberse a buenos niveles cobertura de la infraestructura hidráulica. Por otra parte, también destaca que los edificios mostraron una elasticidad con menor magnitud que las viviendas, lo que puede tener un efecto importante en la DUA de las colonias ubicadas en el Primer y en el Segundo Contorno. Este punto debe tenerse como referencia, aunque aún hace falta distinguir entre los edificios residenciales y los de corte comercial, así como entre los usos interiores y exteriores de agua, para lograr mayor eficiencia en el uso de agua que se vea reflejada en la disminución de volúmenes necesarios para el abasto.

La tipología de domicilios del INEGI, con la que se caracterizó el ambiente urbano construido resultó útil para comprender el componente medido de la DUA desglosado en los tres usos de agua de la CDMX. Esto se evidenció en que las viviendas con actividad económica tuvieron mayor efecto sobre el uso mixto, mientras que los predios correspondientes a los establecimientos y a los servicios se mostraron útiles para explicar el uso no doméstico. En la misma medida, las viviendas incidieron de forma importante en el uso doméstico. Estos resultados sugieren regularidad en la prestación de los servicios hidráulicos y a su vez, son un buen insumo para delinear un diagnóstico oficial. El potencial

de utilizar esta información, radica en vincular el desarrollo urbano de la ciudad con la cantidad de agua requerida; además de comprender la evolución de la DUA en forma temporal y espacial como parte de los principios de la GIAU.

Con respecto a la estimación presentada, a partir de la comparación de los datos medidos con los pronosticados, se puede observar una subestimación de los tres usos, aunque el resultado de 20.86 m³/s es similar al dato reportado por el SACMEX de 22.3 m³/s (GDF, 2007:13). Por otra parte, en SACMEX (2019:62) se plantea que el porcentaje de pérdidas de agua en la red de distribución ascendió a 39% durante el 2010, mientras que los resultados de la estimación de la DUA en comparación con el abasto total, sugieren un porcentaje de pérdidas de 36.78%. Cabe señalar que para llegar a estos resultados similares de estimación de la DUA se utilizaron metodologías diferentes. El tema de pérdidas en fugas es otro reto pendiente para la aplicación de medidas desde la GIAU.

En relación con la micromedición, destaca como prioridad la Ciudad Central para el caso del uso doméstico. Esto se debe a que esta zona se caracteriza por contar con varias colonias con valores altos de consumo de agua, que en su conjunto tienen el porcentaje de cobertura de micromedición más bajo de la ciudad. En cuanto al uso no doméstico, resalta que los modelos de regresión calculan el coeficiente de los usuarios con medidor con un signo negativo, lo cual puede resultar del efecto que tienen los esquemas tarifarios. En este caso, la prioridad debe centrarse en el Tercer Contorno por su baja cobertura y alta intensidad para este uso del agua; en paralelo con conocer el tipo de actividades económicas que se realizan en esta zona en aras de eficientizar el uso no doméstico del agua. En cuanto al uso mixto, destaca la Ciudad Central en términos de la intensidad de uso, que a su vez es donde se concentra el mayor número de colonias con valores altos de consumo.

Con respecto al suministro intermitente de agua o tandeo, destaca que esta variable no es significativa para el uso no doméstico y que también es un factor con poca significancia para los otros dos usos del agua. Estos resultados pueden deberse a la forma en que se midió esta variable, tomando como base los registros de la *Gaceta Oficial CDMX* (GDF, 2010). De acuerdo con los datos que se recabaron en esta investigación, el tandeo no afecta a la ciudad en su generalidad, pero es una situación muy característica del Segundo Contorno y de las periferias ubicadas en las zonas altas del sur-poniente de la CDMX. Idealmente esta variable

debe abordarse como el número de horas de suministro continuo en las colonias, además se debe contemplar la calidad de agua que reciben los usuarios (Jiménez *et al.*, 2011; Tiburcio y Perevochtchikova, 2012). Este punto se enfoca para lograr una mejor comprensión del efecto que tiene el acceso al agua sobre la DUA. Es preciso explorar la disponibilidad de información existente para mejorar los modelos de estimación y a su vez la gestión del agua.

Los resultados expuestos en este trabajo, representan un primer acercamiento para comprender la DUA en la CDMX de forma espacial e integrada, considerando variables urbanas y de acceso al agua. El uso de las variables que caracterizan el ambiente urbano construido permitió realizar una estimación para los tres usos de agua que se reconocen en la legislación local, cuyo resultado es similar a lo expuesto por el SACMEX en GDF (2007) y en SACMEX (2019). Adicionalmente, el análisis de la intensidad de uso del agua permite tener una visión complementaria para ubicar los sitios en donde se pueden generar estrategias para mejorar su eficiencia. Las unidades territoriales del PGDUDF pueden ocultar algunos comportamientos más locales, sobre todo en el caso del Segundo Contorno debido a su extensión territorial. En este sentido, puede resultar más conveniente utilizar el nivel de alcaldía y ver su relación con variables vinculadas a los programas locales de desarrollo urbano para integrar de mejor forma la gestión del agua urbana y el desarrollo urbano.

El análisis de la relación entre los tres usos del agua y el ambiente urbano construido, tiene potencial para proponer medidas enfocadas en la disminución de los volúmenes de abasto de agua que requiere la CDMX. La meta es contar con la información necesaria para la toma de decisiones, con el fin de minimizar la presión ejercida sobre las fuentes de abasto de la ciudad, además de contar con insumos para la implementación de los principios de la GIAU a mediano y largo plazo.

Referencias

ALDF [Asamblea Legislativa del Distrito Federal] (2003), “Ley de Aguas del Distrito Federal”, Ciudad de México, Gobierno del Distrito Federal.

Anselin, L. (2005), *Exploring Spatial Data with GeoDa: A Workbook*. Santa Barbara: Center for Spatially Integrated Social Science.

- Arbués, F., García-Valiñas, M. y Martínez-Espiñeira, R. (2003), “Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review”, *Journal of Socio-Economics*, vol. 32, pp. 81-102.
- Bahri, A. (2011), *Gestión integrada de aguas urbanas*, Estocolomo, Global Water Partnership.
- Baumann, D. y Boland, J. (1997), “The Case for Managing Urban Water”, en Donald Baumann, John Boland, y W. Michael Hanemann (coords.), *Urban Water Demand Management and Planning*, Nueva York, Mc Graw Hill, pp. 1-30.
- Bell, S. (2018), *Urban Water Sustainability. Constructing Infrastructure for Cities and Nature*, Londres, Routledge.
- Billings, R. y Jones, C. (2008), *Forecasting Urban Water Demand* (2 ed.), Denver, American Water Works Association.
- Brown, R., Keath, N. y Wong, T. (2008), “Transitioning to Water Sensitive Cities: Historical, Current and Future Transition States”, ponencia presentada en la “11th International Conference on Urban Drainage”, Reino Unido.
- Burt, J., Barber, G. y Rigby, D. (2009), *Elementary statistics for geographers* (3rd ed.), Nueva York, Guilford.
- Buzai, G. y Baxendale, C. (2012), *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Ordenamiento territorial. Temáticas de base vectorial*, Buenos Aires, Lugar Editorial
- Chang, H. (2017), “Water Conservation” en Douglas Richardson y otros (coords.), *The International Encyclopedia of Geography : People, the Earth, Environment and Technology*, Chichester-West Sussex, Wiley Blackwell, pp. 7623-7628.
- Chang, H., Bonnette, M., Stoker, P., Crow-Miller, B. y Wentz, E. (2017), “Determinants of single family residential water uses across scales in four western US cities”, *Science of the Total Environment*, vol. 596-597, pp. 451-464.
- Chang, H., Hossein, G. y Shandas, V. (2010), “Spatial variation of Single-Family Residential water consumption in Portland, Oregon”, *Urban Geography*, vol. 31, núm. 7, pp. 953-972.

CONAGUA [Comisión Nacional del Agua] (2018), Estadísticas del Agua en México, Ciudad de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

De Maria André, D. y Carvalho, J. (2014), “Spatial Determinants of Urban Residential Water Demand in Fortaleza, Brazil”, *Water Resources Management*, vol. 28, pp. 2401-2414.

Domene, E. y Saurí, D. (2006), “Urbanisation and water consumption: Influencing factors in the metropolitan region of Barcelona”, *Urban Studies*, vol. 43, pp. 1605-1623.

Downs, T., Mazari-Hiriart, M., Domínguez-Mora, R. y Suffet, I. (2000), “Sustainability of least cost policies for meeting Mexico City's future water demand”, *Water Resources Research*, vol. 36, núm. 8, pp. 2321-2339.

Escolero, O., Kraslisch, S., Martínez, S. y 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*, vol. 68, núm. 3, pp. 409-427.

GCDMX [Gobierno de la Ciudad de México] (2016a), Página oficial del Sistema de Aguas de la Ciudad de México “Tipos de Uso”, México <<http://www.sacmex.cdmx.gob.mx/atencion-usuarios/tipos-uso>> (17 de junio de 2018).

GCDMX [Gobierno de la Ciudad de México] (2016b), “Programa de Sustentabilidad y Gestión de los Servicios Hídricos”, *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, Gobierno de la Ciudad de México, 17 de octubre de 2016.

GDF [Gobierno del Distrito Federal] (2003), “Programa General de Desarrollo Urbano del Distrito Federal”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Gobierno de la Ciudad de México, 31 de diciembre de 2003.

GDF [Gobierno del Distrito Federal] (2007), Programa de Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México, Ciudad de México, Secretaría del Medio Ambiente-Secretaría de Obras y Servicios-Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Gobierno de la Ciudad de México.

GDF [Gobierno del Distrito Federal] (2010), “Administración Pública del Distrito Federal-Secretaría de Finanzas”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Gobierno de la Ciudad de México, 13 de mayo de 2010.

GDF [Gobierno del Distrito Federal] (2012), Programa de Gestión Integral de los Recursos Hídricos, Visión 20 Años, Ciudad de México, Secretaría del Medio Ambiente-Sistemas de Agua de la Ciudad de México, Gobierno de la Ciudad de México.

Gober, P., Larson, K., Quay, R., Polsky, C., Chang, H. y Shandas, V. (2013), “Why Land Planners and Water Managers Don't Talk to One Another and Why They Should?”, *Society and Natural Resources*, vol. 26, núm. 3, pp. 356-364.

House-Peters, L. y Chang, H. (2011), “Urban water demand modeling: Review of concepts, method and organizing principles”, *Water Resources Research*, vol. 47, núm. 5, pp. 1-15.

House-Peters, L., Pratt, B. y 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*, vol. 46, núm. 3, pp. 461-472.

INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía] (2010), Vectorial de localidades ameznadas y números exteriores. Cierre de planeación del Censo de Población y Vivienda 2010, México <<https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>> (1 de septiembre de 2019).

INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía] (2018), Comunicación personal vía chat. Ticket no. 539912, México <<http://chat.inegi.org.mx/code/webchatLogin.php>> (19 de Junio de 2018)

Jiménez, B., Gutiérrez, R., Marañón, B. y González, A. (2011), Evaluación de la política de acceso al agua potable en el Distrito Federal, Ciudad de México, Evalúa DF-PUEC-UNAM.

Kayaga, S. y Smout, I. (2011), “Integrated Resources Planning Approach” en Sam Kayaga e Ian Smout (coords.), *Water Demand Management in the City of the Future*, Leicestershire, WEDC, pp. 25-60.

Lehmann, S. (2010), *The principles of green urbanism. Transforming the City for Sustainability*, Londres-Washington DC, Earthscan.

March, H. y Saurí, D. (2009), “What lies behind domestic water use? A review essay on the drivers of domestic water consumption”, *Boletín de la A.G.E.*, vol. 50, pp. 297-314.

Martínez, M. (2004), “La participación de la empresa privada en la gestión de servicios de agua en el Distrito Federal” en María Concepción Martínez Omaña y otros (coords.), Gestión del agua en el Distrito Federal retos y propuestas, Ciudad de México, PUEC-UNAM, pp. 15-57.

Mitchell, G. (2006), “Applying Integrated Urban Water Management Concepts: A Review of Australian Experience”, *Environmental Management*, vol. 37, núm. 5, pp. 589-605.

Morales, J. y Rodríguez, L. (2009), “Política hídrica en la Zona Metropolitana del Valle de México y riesgos para suministrar agua al uso doméstico e industrial” en Delia Montero, Eugenio Gómez, Graciela Carrillo y Lilia Rodríguez (coords.), Innovación tecnológica, cultura y gestión del agua. Nuevos retos del agua en el Valle de México, Ciudad de México, Porrúa-UAM-Cámara de Diputados, pp. 21-53.

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

ONU [Organización de las Naciones Unidas] (2018), Publications. 2018 Revision of World Urbanization Prospects <<https://www.un.org/development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>> (15 de octubre de 2019).

Perevochtchikova, M. (2015), “Agua y Ciudad: El Abasto de Agua Potable en la Ciudad de México”, en Martha Schteingart y Pedro Piréz (coords.), Dos grandes metrópolis latinoamericanas: Ciudad de México y Buenos Aires. Una perspectiva comparativa, Ciudad de México, El Colegio de México, pp. 239-260.

Perló, M., y 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.), Ciudad de México, PUEC-UNAM.

Pinkham, R. (1999), 21st Century Water Systems: Scenarios, Visions, and Drivers, Estados Unidos <<https://rmi.org/insight/21st-century-water-systems-scenarios-visions-and-drivers/>> (15 de diciembre de 2016).

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, México, Posgrado en Geografía, UNAM.

SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México] (2014), Portal de transparencia solicitud de información pública 0324000022614. Total de tomas instaladas con y sin medidor, México <<https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>> (23 de marzo de 2014).

SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2015). Portal de transparencia, solicitud de información pública 0324000105214. Abasto de agua a la Ciudad de México (2008-2013), México <<https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>> (22 de enero de 2015).

SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2019). Librería Virtual. Diagnósticos, logros y desafíos SACMEX 2018, México <<http://data.sacmex.cdmx.gob.mx/aplicaciones/libreria/biblioteca/libros/2018/diagnostico-logros-y-desafios-2018.pdf>> (12 de mayo de 2019).

Saurí, D. (2013), “Water Conservation: Theory and Evidence in Urban Areas of the Developed World”, Annual Review of Environment and Resources, vol. 38, pp. 227-248.

SEDUVI [Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda] (2015), Portal de transparencia, solicitud de información pública 0105000279114. Colonias de la Ciudad de México, México <<https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>> (21 de octubre de 2014).

SEDUVI [Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda] (2019), Datos Abiertos Ciudad de México. Uso de suelo, México <<https://datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/uo-de-suelo/information/>> (1 de septiembre de 2019).

Shandas, V. y 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, vol. 37, pp. 112-128.

Stoker, P., Chang, H., Wentz, G., Crow-Miller, B., Jehle, G., y Bonnette, M. (2019), “Building Water-Efficient Cities”, *Journal of the American Planning Association*, vol. 85, núm. 4, pp. 511-524.

Tiburcio, A. y Perevochtchikova, M. (2012), “Indicadores ambientales en la gestión del agua urbana” en María Perevochtchikova (coord.), *Cultura del agua en México. Conceptualización y vulnerabilidad social*, Ciudad de México, UNAM-Porrúa.

Wentz, A. y Gober, P. (2007), “Determinants of Small-Area Water Consumption for the City of Phoenix, Arizona”, *Water Resources Management*, vol. 21, pp. 1849-1863.

Worthington, A. y Hoffman, M. (2008), “An Empirical Survey of Residential Water Demand Modelling”, *Journal of Economic Surveys*, vol. 22, núm. 5, pp. 842-871.

Anexo 1

Tabla 1.1 Estadísticas descriptivas de las variables bajo estudio en forma logarítmica acomodadas por rubro.

Rubro	Variable	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
Dependientes	Uso Doméstico	11.53	1.58	2.91	15.09
	Uso No Doméstico	9.60	1.83	2.07	15.16
	Uso Mixto	9.33	1.56	1.81	14.28
Control	Micromedición Uso Doméstico	4.07	0.89	-3.06	4.61
	Micromedición Uso No Doméstico	4.24	0.40	1.03	4.61
	Micromedición Uso Mixto	4.31	0.75	-1.39	4.61
Ambiente urbano construido	Conjuntos habitacionales (CH)	1.04	1.30	0.00	6.43
	Edificios (ED)	1.98	1.80	0.00	7.76
	Establecimientos (ES)	2.62	1.51	0.00	8.35
	Otros domicilios (OD)	3.21	1.28	0.00	7.95
	Servicios (SR)	1.50	1.00	0.00	5.34
	Viviendas (VI)	5.86	1.32	0.00	9.36
	Viviendas con actividad económica (VE)	3.38	1.49	0.00	7.26
	Densidad de predios (DN)	2.97	0.84	-2.85	4.47
	Superficie de predios (SP)	2.75	1.20	-4.16	6.21
Acceso al agua	Tandeo (TA)	0.09	0.29	0.00	1.00

Anexo 2

El valor de la R^2 en la Tabla 4 del texto se refiere a la capacidad explicativa del fenómeno bajo estudio en función de las variables seleccionadas; su valor máximo es uno. El valor del AIC es una medida que muestra el ajuste de los modelos, entre más pequeño sea este valor es mayor el ajuste (Anselin, 2005). Los valores para la (t) de Student indican la significancia de las variables al 95%, aparecen entre paréntesis mientras que las celdas vacías corresponden a las variables que no resultaron significativas. Estos valores de (t) son los que indican si las variables tienen o no un efecto relevante sobre el tema estudiado.

Las ecuaciones para el cálculo de la DUA para los tres modelos se definen de la siguiente forma:

$$\ln(\text{Uso Doméstico}) = 3.882 + 1\ln(\text{MC}) + 0.134\ln(\text{CH}) + 0.270\ln(\text{ED}) + 0.103\ln(\text{SR}) + 0.357\ln(\text{VI}) + 0.216\ln(\text{SP}) - 0.193(\text{TA})$$

$$\ln(\text{Uso No Doméstico}) = 10.038 - 0.342\ln(\text{MC}) + 0.206\ln(\text{ED}) + 0.536\ln(\text{ES}) + 0.514\ln(\text{SR}) - 0.590\ln(\text{DN})$$

$$\ln(\text{Uso Mixto}) = 3.919 + 0.378\ln(\text{MC}) + 0.163\ln(\text{ED}) + 0.321\ln(\text{ES}) - 0.211\ln(\text{OD}) + 0.207\ln(\text{SR}) + 0.221\ln(\text{VI}) + 0.429\ln(\text{VE}) + 0.327(\text{TA})$$

Capítulo 3. Análisis estacional y espacial de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México (2008-2018)

Resumen

La Gestión Integrada del Agua Urbana es un paradigma cuya visión busca atender los retos actuales que enfrentan las ciudades para abastecerse de agua, desde este paradigma se ha comprendido la necesidad de abordar el abasto y la demanda como dos elementos de un mismo proceso; por ello resulta crucial entender los determinantes que generan la demanda urbana de agua de forma espacial y temporal. En este contexto, el caso de la Ciudad de México se caracteriza por carecer de un diagnóstico sobre este tema, a pesar de que enfrenta varios problemas relacionados con el abastecimiento de agua y el acceso diferencial al suministro. Por esta razón, en el presente trabajo se estudió el componente medido de la demanda urbana de agua en la CDMX para analizar sus determinantes desde variables relativas de acceso al agua, la micromedición, los reportes de fugas, la temporalidad y la estacionalidad para el periodo 2008-2018. Posteriormente, se estimó el caudal total requerido en 16.2 m³/s en promedio al bimestre. Se analizó la intensidad de uso del agua en forma espacial, mostrando que la zona poniente muestra patrones espaciales significativos de alta intensidad, en contraste con el suroriente de la ciudad.

Introducción

Ante los problemas relacionados con el abastecimiento de agua para las ciudades, debido al crecimiento urbano acelerado y a la alteración de las fuentes disponibles (Saurí, 2013), se han tenido que modificar los objetivos de la gestión urbana del agua para concentrarse en los aspectos que abarca la gestión de la demanda (Baumann y Boland, 1997; Bell, 2018). Es por esto que, desde el paradigma emergente de la Gestión Integrada del Agua Urbana (GIAU), los componentes de demanda y de abasto de agua para las ciudades se conciben como dos elementos de un solo proceso (Bahri, 2011); por ello, la demanda de agua se aborda de forma multifacética y no solamente como una mera cuestión de cantidad (Pinkham, 1999; Mitchell, 2006). A partir de este paradigma se plantea la necesidad de determinar el balance óptimo

entre abasto y demanda, tomando en cuenta diferentes alternativas (Baumann y Boland, 1997), además de la relación que guarda la ciudad con la cuenca donde se asienta (Bell, 2018).

Por estas razones y con el fin de guiar las acciones que deben implementarse según el contexto local, ha surgido la necesidad de plantear una definición operativa para la gestión de la demanda urbana de agua. De acuerdo con Brooks (2007), esta definición cuenta con cinco puntos: (1) reducir la cantidad o calidad del agua según el tipo de uso que se le vaya a dar; (2) ajustar las tareas realizadas, para que se utilice menos cantidad de agua o una calidad menor; (3) disminuir las pérdidas de agua, tanto en calidad como en cantidad; (4) variar el uso de agua según los picos de demanda; y (5) incrementar la habilidad de los sistemas para que continúen con la prestación del servicio de suministro, pese a cualquier situación adversa.

Estos puntos deben orientarse hacia la valoración de fuentes potenciales, que tomen en cuenta diferentes alternativas para el abasto de las ciudades (Mitchell, 2006; Bahri, 2011); por ello se debe contar con una estrategia de medición de los beneficios ambientales, sociales y económicos que se podrían generar con cualquier tipo de intervención que se lleve a cabo (Baumann y Boland, 1997). Ante las necesidades de valoración y medición, resalta la importancia de conocer el comportamiento de la demanda urbana de agua y de sus determinantes (Arbués *et al.*, 2003; Worthington y Hoffman, 2008; House-Peters y Chang, 2011; Chang, 2017).

En cuanto a los organismos operadores, la demanda urbana de agua se define como: “el volumen necesario o requerido para abastecer a los usuarios en un periodo determinado de tiempo” (Billings y Jones, 2008: 4). La demanda urbana de agua se compone por dos elementos: el componente medido y el volumen no facturado; el primero de ellos corresponde al consumo que generan los diferentes tipos de usuarios urbanos, de los cuales se tiene micromedición y registro, en tanto que, el otro componente abarca las pérdidas de agua por fugas, tomas ilegales y caudales no contabilizados (Bell, 2018; CONAGUA, 2019). Desde finales de los años 1970 se han realizados estudios para analizar los determinantes del componente medido de la demanda urbana de agua, donde se ha resaltado la importancia de incluir la dinámica de los sistemas naturales y sociales, además de las escalas en las que tienen lugar dichos procesos (House-Peters y Chang, 2011).

Entre los determinantes que se han estudiado, destacan: el rol de la densificación urbana, que tiende a disminuir el uso del agua (Chang, 2017; Stoker *et al.*, 2019); así como los de tipo socioeconómico y el clima (Arbués *et al.*, 2003; Worthington y Hoffman, 2008), ya que, en particular el uso doméstico tiende a mostrar un patrón estacional (Bell, 2018). Estos determinantes se han estudiado en ciudades de países desarrollados (Saurí, 2013). De acuerdo con House-Peters y Chang (2011), desde el año 2001 se han realizado estudios de demanda urbana de agua en unidades espaciales, que han mostrado la relevancia de incluir la contigüidad entre este tipo de unidades para explicar los patrones espaciales que muestra la demanda.

En el caso de las ciudades de países desarrollados, los determinantes del componente medido que conforma la demanda urbana de agua, se han relacionado con la suburbanización y con la presencia de viviendas unifamiliares (Saurí, 2013; Chang, 2017). Por otro lado, el panorama en las áreas urbanas de los países en vías de desarrollo es muy diferente, ya que el acceso óptimo al agua no cubre a toda la población y a la vez existen contrastes en los consumos de agua según las condiciones socioeconómicas de los habitantes, a estos dos puntos se deben añadir las pérdidas de caudales por fugas como reflejo de una infraestructura precaria y también los altos niveles de agua no contabilizada (Bell, 2018). Estos aspectos caracterizan el caso de la Ciudad de México, en donde los determinantes como el suministro intermitente y el Índice de Desarrollo Social tienen mayor peso en la explicación del uso doméstico de agua en comparación con la densidad de vivienda (Ramos-Bueno *et al.*, 2021).

La relevancia de este caso de estudio radica en la necesidad de una comprensión sistémica del rol que juega el acceso diferenciado al agua, la micromedición, el reporte de fugas, la temporalidad y los ciclos estacionales en la explicación de la demanda urbana de agua, por ello se plantean los siguientes objetivos:

- Explicar el componente medido de la demanda urbana de agua en forma bimestral, en las alcaldías de la CDMX a partir de variables que caracterizan el acceso al agua, micromedición, reporte de fugas, temporalidad y estacionalidad para el periodo 2008-2018.
- Estimar la demanda urbana de agua en forma bimestral, en las alcaldías de la CDMX.
- Calcular la intensidad de uso del agua en las alcaldías de la CDMX.

- Detectar los patrones espaciales que muestra la intensidad de uso del agua a nivel de alcaldías en la CDMX.

El primer objetivo tiene su sustento en los problemas de acceso al agua que existen en la ciudad y que ocurren de forma diferenciada, como se ha expuesto en Jiménez *et al.* (2011). En esta publicación se menciona la importancia de comprender la frecuencia con la que se suministran las viviendas, así como hacer hincapié en la calidad del agua que reciben. Estos autores plantean que se debe poner atención en estas características y no solamente en la cobertura de tomas instaladas. Por otra parte, los trabajos de Martínez (2004) y de Ramos-Bueno *et al.* (2021) dan cuenta de la falta de micromedición en algunas partes de la ciudad, lo que plantea la necesidad de generar estimaciones para la demanda urbana de agua en su conjunto, que sirvan para la planificación del uso de los recursos hídricos en el mediano plazo (Billings y Jones, 2008), ya que, según GDF (2012) y SACMEX (2019a) la problemática que enfrenta la ciudad tenderá a acrecentarse.

El segundo objetivo se basa en que la demanda de agua en la Ciudad de México se ha estudiado en menor medida, en comparación con otros temas de la gestión del agua como lo es la condición de la infraestructura para el abasto que se encuentra operando al límite (Escolero *et al.*, 2016); el descenso de los niveles piezométricos de los acuíferos locales (Martínez *et al.*, 2015); o el abasto mediante un sistema regional compuesto por cinco sistemas de pozos y manantiales dentro de la CDMX, los sistemas Barrientos, Chiconautla y Caldera que se localizan en la misma cuenca pero fuera de los límites de la ciudad, además de la importación de caudales desde cuencas vecinas mediante los sistemas Lerma y Cutzamala (CONAGUA, 2013; GDF, 2012; Ramos-Bueno y Perevochtchikova, 2020).

En este contexto es prioritario comprender el rol de la demanda. Entre los estudios que se han realizado sobre este tema, destacan el de Downs *et al.* (2000) en donde se presentó una estimación basada en un modelo probabilístico para diferentes usos de agua en la CDMX y en los municipios conurbados que la rodean, también se hizo una proyección para el año 2015. Por otra parte, en el estudio de Soto y Herrera-Pantoja (2016) se relacionaron la temperatura y la precipitación con el consumo doméstico bimestral de agua en la ciudad, que se puso en el contexto de dos escenarios de cambio climático. Adicionalmente, en Ramos-Bueno *et al.* (2021) se realizó un análisis de este mismo uso de agua a nivel colonia y se

abordó su relación con variables de tipo socioeconómico. Los primeros dos estudios carecen de una visión espacial explícita, mientras que el tercer análisis sólo cubre de manera anual el uso doméstico de agua para el año 2010, por lo que se requiere una comprensión tanto temporal y espacial más amplia para guiar la toma de decisiones.

Los objetivos tres y cuatro abordan la demanda urbana de agua en términos de la cantidad de usuarios registrados. Con estos dos análisis se pretende hacer un primer acercamiento a la distribución espacial de los usos interiores y exteriores del agua. En general, se ha encontrado que en las zonas con alta densidad de viviendas se disminuyen los usos exteriores de agua (Domene y Saurí, 2006; Chang *et al.*, 2010; Chang *et al.*, 2017; Stoker *et al.*, 2019), en tanto que el tamaño del hogar es un buen predictor de los usos interiores (Wentz y Gober, 2007; Kontokosta y Jain, 2015). El principal aporte de este análisis es contar con una herramienta para localizar los sitios, en donde es pertinente plantear acciones hacia un uso más eficiente del agua.

Metodología

El componente medido de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México se definió como la suma de los volúmenes facturados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), correspondientes a los usos doméstico, mixto y no doméstico de agua. De acuerdo con la Ley de Aguas del Distrito Federal, un usuario se refiere a la persona física o moral que contrata alguno de los servicios hidráulicos provistos por el SACMEX (suministro de agua potable, drenaje y alcantarillado). Por su parte, el uso doméstico se refiere al agua utilizada en el ámbito de las viviendas; el uso mixto engloba las tomas instaladas en los inmuebles que cuentan con usos habitacionales y no habitacionales simultáneamente; y el uso no doméstico comprende a los establecimientos comerciales e industriales que contrataron los servicios del SACMEX (ALDF, 2003). El presente estudio se realizó tomando en cuenta datos bimestrales para los tres tipos de uso del agua, durante el periodo 2008-2018, agrupados en las alcaldías que componen la ciudad que constituyeron la unidad espacial de análisis.

La regresión lineal múltiple de mínimos cuadrados (OLS) es un método con el que se busca explicar una variable dependiente en términos de una o más variables independientes

(Burt *et al.*, 2009; Wooldrige, 2013). Este método se ha utilizado ampliamente para estudiar el componente medido de la demanda urbana de agua (Arbués *et al.*, 2003; Worthington y Hoffman, 2008; House-Peters y Chang, 2011); con el cual se han podido comprender los efectos de la densidad de vivienda, la presencia de jardines y las características de la urbanización sobre el uso del agua (Domene y Saurí, 2006; Wentz y Gober, 2007; Chang *et al.*, 2010; Chang *et al.*, 2017; Stoker *et al.*, 2019), así como el tamaño del hogar sobre el consumo en términos brutos (Wentz y Gober, 2007) y en intensidad (Kontokosta y Jain, 2015).

El uso de la regresión múltiple OLS presenta varias ventajas para su utilización en el análisis y proyección de la demanda urbana de agua, cuya aplicación radica en la toma de decisiones al interior de los organismos operadores (Billings y Jones, 2008). Sin embargo, al momento de incluir datos temporales y estacionales en unidades espaciales, para explicar la demanda urbana de agua, se debe considerar que este método presenta las siguientes limitaciones: (1) los efectos de contigüidad entre las unidades espaciales (House-Peters y Chang, 2011); (2) la autocorrelación espacial de los residuales obtenidos mediante la estimación del modelo (Buzai y Baxendale, 2012); y (3) la influencia de la evolución periódica y estacional de los datos temporales y estacionales (Burt *et al.*, 2009; Wooldrige, 2013). Para abordar estas limitaciones, se han tenido que hacer ajustes al modelo de regresión lineal múltiple OLS.

Para realizar el estudio temporal y estacional del componente medido de la demanda urbana de agua en las alcaldías de la Ciudad de México, para el periodo 2008-2018, se utilizó la propuesta de Ostertagova y Ostertag (2015) donde se contempla un modelo general de serie de tiempo de la siguiente forma:

$$y_t = T_t + S_t + \varepsilon_t \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde T_t es el componente tendencial de la serie de tiempo, dado que describe el movimiento a largo plazo y permite saber si se muestran incrementos o decrementos. S_t es el componente estacional que consiste en patrones de cambio en un periodo menor a un año, además que tiende a estar marcado por una calendarización determinada. Finalmente, ε_t es el

componente aleatorio cuyo comportamiento no se le puede atribuir a los dos anteriores (Burt *et al.*, 2009). De acuerdo con la exposición de Ostertagova y Ostertag (2015) el modelo general se desagrega de la siguiente forma:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \alpha_2 d_{t2} + \alpha_3 d_{t3} + \alpha_4 d_{t4} + \varepsilon_t \text{ (Ecuación 2)}$$

En este caso, β_0 es el coeficiente del intercepto de la serie de tiempo; $\beta_1 t$ corresponde al coeficiente del componente tendencial de la serie, que aparece en el modelo general como T_t . Los coeficientes α corresponden a los periodos de la estacionalidad y se abordan a partir de variables cualitativas mediante los vectores d_2 , d_3 y d_4 que tienen valores de cero y uno según el periodo correspondiente (Ostertagova y Ostertag, 2015). Además de los comportamientos tendencial y estacional, se añadieron las variables de micromedición, acceso al agua y reportes de fugas para construir tres modelos por cada uno de los usos de agua. Estos tres modelos se estimaron en cada una de las 16 alcaldías de la ciudad, sumando un total de 48 análisis. A continuación, en la Tabla 1 se muestra la definición de cada una de las variables utilizadas, así como su clasificación y su fuente de obtención:

Tabla 1 Clasificación, definición operativa, unidades y fuentes de obtención de las variables utilizadas para estimar el componente medido de la demanda urbana bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México.

Clasificación	Variable	Definición operativa	Unidades	Fuente de obtención
Variables dependientes	Uso doméstico	Uso del agua aplicado en el ámbito de las viviendas.	m ³ bimestre	(SACMEX, 2021a)
	Uso mixto	Uso del agua destinado a inmuebles que tienen usos habitacionales y no habitacionales de forma simultánea.	m ³ bimestre	
	Uso no doméstico	Uso del agua aplicado en establecimientos comerciales o industriales.	m ³ bimestre	
Ajuste temporal para la estimación del modelo	Tendencial (T)	Corresponde al conteo continuo de los 66 bimestres bajo estudio para el periodo 2008-2018	Conteo continuo de 0 a 65	(Ostertagova y Ostertag, 2015)
	Estacionalidad (BIM01, BIM02,	Componente abordado de manera categórica que denota	0, 1	

	BIM03, BIM04, BIM05 y BIM06)	cada uno de los bimestres bajo estudio		
Micromedición	Usuarios con medidor (Medidor)	Variable control, hace referencia a los usuarios del agua de cada uno de los usos registrados en el régimen de servicio medido del SACMEX	Total de usuarios por bimestre	(SACMEX, 2021b)
Acceso al agua	Falta de agua	Total de reportes de falta de agua recabados por el SACMEX en el periodo 2008-2018	Total de reportes por bimestre	(SACMEX, 2020)
	Mala calidad del agua	Total de reportes de mala calidad recabados por el SACMEX en el periodo 2008-2018	Total de reportes por bimestre	(SACMEX, 2020)
	Suministro (días)	Promedio de días de abastecimiento continuo	Número de días con abasto continuo	(SACMEX, 2019b)
Reporte de fugas	Fugas	Total de reportes de fugas recabados por el SACMEX en el periodo 2008-2018	Total de reportes por bimestre	(SACMEX, 2020)

Todos los modelos se estimaron con una forma log-log para interpretar los coeficientes obtenidos como elasticidades que son comparables entre sí (Wooldrige, 2013). Para determinar las variables que mejor contribuyen a explicar las variables dependientes, se ajustaron los modelos de regresión lineal múltiple OLS a través de la regresión de *stepwise* en forma *backward*, por lo que, en cada caso se ingresaron todas las variables y se fueron eliminando según su ajuste (Billings y Jones, 2008; Chang *et al.*, 2010). Este procedimiento se realizó en el software R versión 4.1.0, disponible en (<https://cran.r-project.org/>) y se tomó como criterio de ajuste el valor del Akaike Information Criterion (AIC), que correspondió al más bajo calculado (Anselin, 2005).

Posteriormente, se compararon los pronósticos generados por los modelos con los datos medidos para observar sus ajustes. Dado que se obtuvieron 16 modelos para cada uno de los tres usos del agua, se desplegaron los coeficientes beta obtenidos en un mapa y se determinó la existencia de patrones espaciales mediante el Análisis Local de Asociación Espacial (LISA), por ello se midió la autocorrelación espacial con la I de Moran, cuya significancia se probó con una aleatorización de 999 permutaciones (Anselin, 2005; Buzai y Baxendale, 2012). De esta forma se detectó la agrupación de valores altos o bajos para los coeficientes que resultaron significativos. Estos análisis se realizaron con el software GeoDa

versión 1.18.0 disponible en (<https://geodacenter.github.io/download.html>); para realizar este cálculo se utilizó una matriz de *Queen* con la que se definió la contigüidad espacial entre alcaldías como unidad de análisis (Anselin, 2005).

Una vez calculados los coeficientes para los usos doméstico, mixto y no doméstico de agua en cada una de las alcaldías de la Ciudad de México, se procedió a la estimación de la demanda urbana bimestral de agua. Para abordar el componente de agua no contabilizada, se utilizaron los coeficientes estimados con el análisis del componente medido; estos coeficientes se multiplicaron por los datos de usuarios que no tienen medidor (SACMEX 2021b). De esta forma se calcularon los volúmenes bimestrales totales que requiere la ciudad, conjuntando el componente medido y el agua no contabilizada (Billings y Jones, 2008; CONAGUA, 2019a). Posteriormente, se realizó un análisis de varianza de un factor con los datos promedio de la demanda urbana estimada bimestral, para explorar el comportamiento estacional del consumo de agua en las alcaldías. Se compararon los datos estimados con una estimación expuesta en SACMEX (2019a: 62), que cubre el periodo 2009-2017.

La estimación de la demanda urbana de agua permitió realizar el análisis de intensidad de los usos doméstico, mixto y no doméstico como litros por usuario al día. Para ello, se utilizó la base de datos de usuarios referenciada en SACMEX (2021b) y se calculó la intensidad con respecto al promedio anual para el periodo 2008-2018. En este caso, también se realizaron los tres análisis LISA para cada uno de los usos de agua. De forma adicional, se descargaron los datos censales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el año 2020 (INEGI, 2021). A partir de estos datos, solamente se utilizó la información correspondiente al total de viviendas particulares con las que cuenta la ciudad, la población que habita en ellas y la extensión de la zona urbana en hectáreas. De igual forma, se descargó el total unidades económicas registradas por alcaldía y el total de personas ocupadas según el censo económico de 2019 (INEGI, 2020).

Los datos obtenidos del INEGI sirvieron como referencia para caracterizar los usos interiores y exteriores de agua; por ello el total de viviendas y el total de unidades económicas registradas, así como el total de habitantes y el personal ocupado por alcaldía se conjuntaron con los datos de intensidad de uso doméstico, mixto y no doméstico de agua. Para ello, primero se calculó la densidad de vivienda y la de unidades económicas con respecto al área

urbana; posteriormente se obtuvieron el tamaño del hogar y el número de personas ocupadas por unidad económica. Se realizó el análisis LISA para detectar patrones en la distribución espacial de la intensidad de cada uno de los tres usos del agua. Una vez obtenidos los clústeres espaciales, se obtuvieron los promedios de las características censales seleccionadas para describirlas dentro de las unidades espaciales.

Resultados

En la Tabla 2 (en la siguiente página) aparecen las estadísticas descriptivas de las variables utilizadas para estimar los modelos de regresión *stepwise* de manera *backward* correspondientes al uso doméstico, mixto y no doméstico de agua. Se muestran los valores mínimos y máximos, así como el primer y el tercer cuartil, la mediana, la media y la desviación estándar de todas las variables estudiadas. Entre paréntesis aparecen las unidades de medición de cada variable. De forma complementaria, en la sección de Anexo se presentan las estadísticas descriptivas desglosadas por alcaldía (Tabla 9, 10 y 11); esta información corresponde al promedio bimestral para el periodo 2008-2018.

Las Tablas 3, 4 y 5 contienen los resultados de los modelos estimados para los usos doméstico, mixto y no doméstico respectivamente. En ellas aparecen las variables que resultaron significativas después de estimar la regresión de *stepwise* de forma *backward* para los tres usos del agua en cada una de las 16 alcaldías. Dado que las variables de sexto bimestre y de suministro no resultaron significativas, se omitieron de las tablas de resultados. Las columnas de las tablas designan las variables estudiadas y las filas muestran las alcaldías de la ciudad. En la parte baja, se anotaron los valores de la I de Moran para cada uno de los determinantes, acompañados entre paréntesis de los valores de p asociados, cuyos cálculos se realizaron con aleatorizaciones de 999 permutaciones. El primer componente que aparece después del intercepto es el tendencial (T), seguido por el estacional, que muestra los bimestres del primero al quinto. Después de estos componentes, aparece la micromedición designada como “Medidor”, seguida por las dos variables de acceso al agua (“Mala calidad” y “Falta”). Finalmente aparece el componente de reporte de fugas (“Fugas”) y los valores de R^2 para cada una de las alcaldías. Los coeficientes se interpretan como elasticidades.

Tabla 2 Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas para analizar el componente medido de la demanda urbana de agua en forma bimestral en las alcaldías de la CDMX, durante el periodo 2008-2018. Variable dependiente = miles m³ bimestre.

Variable (unidades de medida)	Mínimo	Primer cuartil	Mediana	Media	Tercer cuartil	Máximo	Desviación estándar
Uso doméstico (miles m ³ bimestre)	18.81	878.66	2,165.74	2,238.56	3,188.09	5,692.90	1,351.79
Uso mixto (miles m ³ bimestre)	6.84	83.23	304.82	310.41	436.58	895.64	239.86
Uso no doméstico (miles m ³ bimestre)	8.33	178.05	610.44	639.20	841.31	2,358.99	532.78
Micromedición uso doméstico (total de usuarios con medidor por bimestre)	870	29,951	64,549	70,527	107,938	181,920	44,169.95
Micromedición uso mixto (total de usuarios con medidor por bimestre)	142	1,863	4,230	4,671	6,030	17,964	3,719.42
Micromedición uso no doméstico (total de usuarios con medidor por bimestre)	136	1,411	4,978	6,346	9,132	25,880	6,011.76
Reportes por falta de agua (total de reportes por bimestre)	0	217	478	621	863	4,791	567.27
Reportes por mala calidad del agua (total de reportes por bimestre)	0	7	17	27	37	290	32.28
Suministro (promedio de días al bimestre con suministro continuo)	18.34	26.92	39.64	42.44	60.00	60.00	16.33
Reportes de fugas (total de reportes por bimestre)	1	162	270	396	587	2,346	331.19

Fuente: elaboración propia con base en los datos de SACMEX, (2019b); (2020); (2021a); (2021b).

Los resultados del modelo para el uso doméstico (Tabla 3) muestran que el componente tendencial (T) es altamente significativo para todas las alcaldías, excepto en Cuauhtémoc donde tuvo baja significancia (valor de t -1.707) y en Cuajimalpa donde no fue significativo. Los coeficientes de este componente aparecieron con signos negativos, lo que indica una tendencia de disminución del uso doméstico de agua para el periodo 2008-2018, además el valor para la I de Moran mostró la existencia de un patrón espacial significativo para estos coeficientes (el valor de p asociado es menor a 0.05). En cuanto al componente estacional, los coeficientes del primer bimestre (enero-febrero) tienen signos negativos, lo que indica una reducción significativa de la demanda de agua en algunas alcaldías para ese periodo; esto contrasta con los bimestres 2, 3 y 4 (periodo que corresponde a los meses de marzo a agosto) en donde los signos positivos muestran un aumento significativo en varias de las alcaldías. Por otra parte, los signos del quinto bimestre (septiembre-octubre) también exhiben signos negativos excepto en el caso de Gustavo A. Madero. Tanto los bimestres 2 y 3 como el 5 mostraron patrones espaciales significativos.

La micromedición resultó significativa en todas las alcaldías y en todos los casos fue el determinante que tuvo mayor magnitud y signo positivo, esto muestra que el aumento de este componente hará que incremente la demanda de agua para este tipo de uso. Destaca el caso de Benito Juárez, en donde aumentar en 1% el número de usuarios con medidor incrementaría el uso doméstico bimestral en 1.13%, similar al caso de Milpa Alta con 1.10%. La variable que conjunta los reportes de mala calidad de agua mostró signos negativos en seis alcaldías lo que representa una reducción del uso doméstico, caso contrario, el ocurrido con los reportes de falta de agua y de fugas. Este resultado puede deberse a la agregación de los datos en términos espaciales, es necesario hacer este ejercicio a una escala más fina. Adicionalmente, estas variables de acceso al agua mostraron patrones espaciales con moderada significancia (valor de p de 0.046 para mala calidad y de 0.047 para reportes de falta de agua). Los valores de la R^2 van de 0.45 en Cuauhtémoc a 0.99 en Milpa Alta señalando los sitios con mayor y menor explicación para el uso doméstico de agua.

De manera similar al uso doméstico, el componente tendencial del uso mixto resultó significativo para todas las alcaldías de la ciudad (Tabla 4), en todos los casos aparecieron signos negativos además de mostrar un patrón espacial significativo. El caso del primer

bimestre, al igual que el uso doméstico, exhibe signos negativos en casi las mismas alcaldías. Por otro lado, los bimestres del 2 al 4 tuvieron signos positivos y mostraron patrones espaciales significativos, siendo el bimestre 3 el que muestra el patrón con mayor magnitud para la I de Moran (0.574 con un valor de p de 0.002). Por otra parte, la micromedición resultó significativa en casi todas las alcaldías. Destaca el caso de Cuajimalpa, donde este componente se tuvo que estimar como porcentaje y no como cuenta total, dando como resultado una interpretación diferente al resto, ya que el aumento de un punto porcentual de los usuarios con medidor incrementaría en 0.86% el uso mixto bimestral.

Las variables de reportes de mala calidad, falta de agua y fugas presentaron de forma variada signos positivos y negativos en las alcaldías de la ciudad, por lo que su contribución a la explicación del uso mixto no sigue un patrón distinguible. En este mismo sentido, ninguno de los coeficientes mostró patrones espacialmente significativos. Los valores de R^2 van de 0.36 en Miguel Hidalgo hasta 0.98 en Milpa Alta.

Los resultados obtenidos para el uso no doméstico (Tabla 5) muestran que el componente tendencial resultó significativo en nueve alcaldías y solamente en el caso de Magdalena Contreras apareció con signo positivo. El componente estacional tuvo resultados similares a los del uso doméstico, dado que el primer bimestre muestra signos negativos en varias alcaldías al igual que el bimestre 5. Por su parte los bimestres 2, 3 y 4 mostraron signos positivos y solamente el tercero es el único determinante que exhibió un patrón espacial significativo.

En cuanto a la micromedición, en 13 alcaldías resultó significativa como cuenta total similar a los usos doméstico y mixto, sin embargo, para los casos de Tlalpan y Venustiano Carranza se tuvo que estimar como porcentaje y en el caso de Cuajimalpa esta variable no resultó significativa. Las variables de reportes de mala calidad, fugas y falta de agua mostraron poca contribución para explicar el uso no doméstico, dado que las primeras dos solamente resultaron significativas en cinco alcaldías, en tanto que la variable restante sólo en cuatro. En general, todos los coeficientes cuentan con signos positivos, lo que sugiere la necesidad de examinar estas variables en una escala más fina.

Tabla 3 Coeficientes tendenciales, estacionales, de micromedición y de acceso al agua para estimar el uso doméstico bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

Alcaldía	(Intercepto)	T	BIM01	BIM02	BIM03	BIM04	BIM05	Medidor (cuenta)	Mala calidad	Falta	Fugas	R ²
Álvaro Obregón	9.422 (13.149)	-0.002 (-5.173)		0.040 (3.659)	0.040 (3.621)	0.025 (2.219)	-0.020 (-1.841)	0.495 (7.937)	-0.008 (-2.257)		0.026 (2.593)	0.65
Azcapotzalco	6.539 (10.368)	-0.004 (-6.21)	-0.037 (-2.436)		0.025 (1.634)	0.026 (1.758)		0.740 (12.543)		0.023 (3.179)	-0.037 (-3.203)	0.81
Benito Juárez	1.795 (3.113)	-0.006 (-10.98)	-0.026 (-3.083)		0.016 (1.806)	0.022 (2.586)		1.135 (22.403)	-0.014 (-3.324)	0.009 (1.853)	0.016 (1.798)	0.96
Coyoacán	6.536 (21.897)	-0.003 (-9.455)		0.031 (3.261)	0.030 (3.086)	0.029 (3.028)		0.725 (28.032)			0.018 (1.933)	0.95
Cuajimalpa	7.424 (27.846)			0.037 (2.838)	0.037 (2.96)	0.023 (1.904)	-0.033 (-2.675)	0.622 (24.723)		0.022 (2.462)		0.91
Cuauhtémoc	9.585 (8.691)	-0.001 (-1.707)	-0.031 (-1.98)					0.450 (4.695)			0.020 (1.648)	0.45
Gustavo A. Madero	12.816 (24.15)	-0.003 (-13.098)		0.034 (3.029)	0.034 (3.05)	0.037 (3.388)	0.021 (1.897)	0.218 (4.835)				0.75
Iztacalco	4.897 (9.759)	-0.007 (-21.468)	-0.029 (-3.841)		0.016 (2.315)	0.035 (5.007)		0.895 (19.149)	0.008 (2.356)			0.88
Iztapalapa	11.775 (14.947)	-0.007 (-17.075)						0.298 (4.539)			0.021 (1.905)	0.92
Magdalena Contreras	5.460 (4.784)	-0.005 (-13.317)		0.043 (2.074)	0.050 (2.376)		-0.039 (-1.891)	0.840 (6.997)	-0.016 (-1.665)			0.81
Miguel Hidalgo	9.814 (13.677)	-0.002 (-3.931)		0.039 (3.599)	0.040 (3.645)	0.030 (2.742)	-0.019 (-1.795)	0.453 (7.113)	-0.012 (-2.082)		0.020 (2.002)	0.67
Milpa Alta	2.480 (16.985)	-0.006 (-15.516)	-0.029 (-1.732)	0.026 (1.638)	0.069 (4.38)	0.042 (2.676)		1.109 (64.252)	-0.020 (-3.229)		0.014 (1.416)	0.99
Tláhuac	4.967 (15.766)	-0.006 (-21.674)	-0.028 (-1.87)					0.836 (26.801)			0.034 (3.256)	0.96
Tlalpan	4.019 (4.875)	-0.005 (-13.167)		0.034 (2.281)	0.063 (4.065)	0.042 (2.802)		0.931 (12.657)	-0.028 (-4.93)	0.062 (5.651)		0.94
Venustiano Carranza	6.039 (12.531)	-0.005 (-14.894)	-0.030 (-4.341)			0.025 (3.741)		0.780 (17.265)			0.009 (1.556)	0.83
Xochimilco	5.160 (7.018)	-0.006 (-16.557)		0.025 (2.236)	0.047 (4.111)	0.035 (3.05)		0.826 (11.684)			0.022 (2.317)	0.84
I Moran (valor de p asociado)	0.040 (0.41)	0.377 (0.012)	.0129 (0.124)	0.337 (0.012)	0.325 (0.015)	-0.175 (0.232)	0.350 (0.007)	-0.034 (0.404)	0.216 (0.046)	-0.216 (0.047)	0.018 (0.282)	

n = 1,056. Los valores calculados para la t de Student se encuentran entre paréntesis debajo de los coeficientes

Tabla 4 Coeficientes tendenciales, estacionales, de micromedición y de acceso al agua para estimar el uso mixto bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

Alcaldía	(Intercepto)	T	BIM01	BIM02	BIM03	BIM04	Medidor (cuenta)	Mala Calidad	Falta	Fugas	R ²
Álvaro Obregón	9.658 (9.186)	-0.002 (-5.099)	-0.017 (-1.43)		0.017 (1.519)	0.024 (2.074)	0.348 (2.78)	-0.007 (-1.634)	0.021 (2.238)		0.41
Azcapotzalco	2.512 (2.538)	-0.004 (-4.698)	-0.059 (-3.938)	-0.032 (-2.198)			1.212 (10.174)		0.026 (3.676)	-0.035 (-3.339)	0.86
Benito Juárez	3.880 (7.671)	-0.004 (-17.842)	-0.032 (-3.531)			0.027 (2.964)	1.085 (18.158)		0.010 (2.205)		0.85
Coyoacán	5.177 (5.008)	-0.003 (-5.621)	-0.031 (-2.505)				0.895 (6.95)	0.022 (3)	-0.027 (-2.811)		0.60
Cuajimalpa	10.657 (56.879)	0.007 (6.452)					0.862* (3.525)			0.072 (2.989)	0.76
Cuauhtémoc	8.628 (10.032)	-0.002 (-4.825)					0.562 (5.699)	-0.012 (-1.531)		0.023 (1.803)	0.32
Gustavo A. Madero	6.659 (18.612)	-0.002 (-4.935)	-0.026 (-2.727)			0.024 (2.542)	0.734 (18.683)		0.009 (1.373)	-0.023 (-2.28)	0.92
Iztacalco	6.164 (16.34)	-0.005 (-13.473)	-0.026 (-2.74)			0.032 (3.605)	0.780 (17.198)	0.012 (2.537)	-0.011 (-2.123)		0.83
Iztapalapa	6.411 (8.896)	-0.004 (-12.982)	-0.036 (-3.187)			0.020 (1.798)	0.746 (9.501)				0.73
Magdalena Contreras	5.680 (12.081)	-0.002 (-2.973)		0.036 (1.633)	0.062 (2.726)	0.056 (2.554)	0.757 (10.599)	-0.021 (-2.083)			0.80
Miguel Hidalgo	10.680 (9.44)	-0.001 (-1.731)	-0.040 (-2.156)				0.251 (1.798)	-0.053 (-5.381)		0.071 (4.021)	0.36
Milpa Alta	3.803 (23.497)	-0.012 (-10.691)		0.049 (2.401)	0.064 (3.232)	0.043 (2.113)	1.008 (31.122)		-0.044 (-3.472)	0.050 (3.149)	0.98
Tláhuac	4.335 (29.973)	-0.007 (-18.294)		0.024 (1.981)	0.024 (1.992)	0.021 (1.698)	0.924 (44.775)	0.009 (2.078)	-0.017 (-2.285)	0.036 (4.155)	0.97
Tlalpan	5.811 (17.196)	-0.003 (-3.977)			0.075 (3.234)	0.038 (1.719)	0.745 (21.283)	-0.033 (-3.528)	0.100 (5.603)	-0.060 (-2.048)	0.96
Venustiano Carranza	5.648 (16.927)	-0.004 (-12.173)	-0.030 (-3.483)			0.028 (3.284)	0.855 (21.957)		-0.012 (-2.355)		0.90
Xochimilco	5.455 (23.064)	-0.005 (-12.405)		0.021 (2.109)	0.047 (4.662)	0.029 (3.01)	0.798 (26.088)	0.013 (2)	-0.010 (-1.397)		0.95
I Moran (valor de p asociado)	0.150 (0.113)	0.265 (0.003)	0.148 (0.104)	0.224 (0.044)	0.574 (0.002)	0.270 (0.035)	-0.242 (0.10)	0.037 (0.227)	-0.178 (0.188)	0.083 (0.184)	

n = 1,056. Los valores calculados para la t de Student se encuentran entre paréntesis debajo de los coeficientes. *Coeficiente estimado como porcentaje

Tabla 5 Coeficientes tendenciales, estacionales, de micromedición y de acceso al agua para estimar el uso no doméstico bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

Alcaldía	(Intercepto)	T	BIM01	BIM02	BIM03	BIM04	BIM05	Medidor (cuenta)	Calidad	Falta	Fugas	R ²
Álvaro Obregón	8.955 (15.035)			0.042 (2.628)	0.037 (2.275)	0.046 (2.799)		0.509 (8.163)		0.027 (1.821)		0.55
Azcapotzalco	9.262 (9.023)	-0.006 (-6.827)	-0.089 (-4.08)	-0.043 (-2.012)			-0.035 (-1.71)	0.507 (4.022)		-0.027 (-1.776)	0.033 (3.308)	0.55
Benito Juárez	3.033 (1.552)	-0.003 (-2.684)	-0.030 (-1.614)			0.034 (1.886)		1.125 (5.426)				0.59
Coyoacán	8.961 (31.553)							0.476 (13.59)		0.047 (2.784)		0.79
Cuajimalpa	11.890 (573.144)	0.007 (15.13)		0.056 (2.139)	0.058 (2.212)	0.044 (1.673)						0.78
Cuauhtémoc	10.236 (9.581)	-0.003 (-4.15)				0.033 (1.918)		0.426 (3.948)		0.020 (1.52)		0.21
Gustavo A. Madero	8.766 (16.179)					0.057 (2.568)		0.536 (8.797)	0.031 (3.168)			0.64
Iztacalco	9.566 (12.615)	-0.004 (-4.74)	-0.031 (-1.602)			0.028 (1.453)	-0.056 (-2.977)	0.402 (4.224)			-0.014 (-1.368)	0.32
Iztapalapa	6.905 (8.249)	-0.005 (-3.323)	-0.049 (-1.868)			0.055 (2.126)	-0.039 (-1.514)	0.737 (7.589)				0.78
Magdalena Contreras	19.075 (14.414)	0.007 (6.699)			0.059 (2.602)	0.060 (2.682)	-0.036 (-1.642)	-1.132 (-5.649)	-0.018 (-1.784)			0.47
Miguel Hidalgo	7.103 (2.805)	-0.002 (-2.579)		0.035 (2.965)	0.038 (3.235)	0.050 (4.262)		0.773 (2.785)	0.011 (2.036)			0.34
Milpa Alta	5.792 (23.109)		-0.141 (-3.546)	-0.090 (-2.253)	-0.086 (-2.167)		-0.088 (-2.211)	0.737 (16.707)			-0.031 (-1.65)	0.82
Tláhuac	10.442 (52.241)		-0.047 (-1.76)		-0.051 (-1.924)		-0.055 (-2.053)	0.173 (5.881)	0.021 (2.284)			0.39
Tlalpan	13.294 (169.403)	-0.001 (-2.012)		0.039 (2.664)	0.051 (3.501)	0.069 (4.707)		0.237* (1.791)			0.018 (1.64)	0.30
Venustiano Carranza	12.913 (709.277)					0.045 (2.09)		-0.136* (-2.825)				0.14
Xochimilco	12.913 (48.001)		-0.056 (-2.279)	0.034 (1.36)				-0.112 (-2.756)	0.048 (3.106)		-0.039 (-2.078)	0.29
I Moran (valor de p asociado)	0.091 (0.144)	0.091 (0.144)	0.127 (0.09)	-0.018 (0.337)	0.345 (0.006)	0.030 (0.255)	0.064 (0.176)	-0.002 (0.291)	-0.027 (0.368)	-0.002 (0.309)	-0.064 (0.452)	

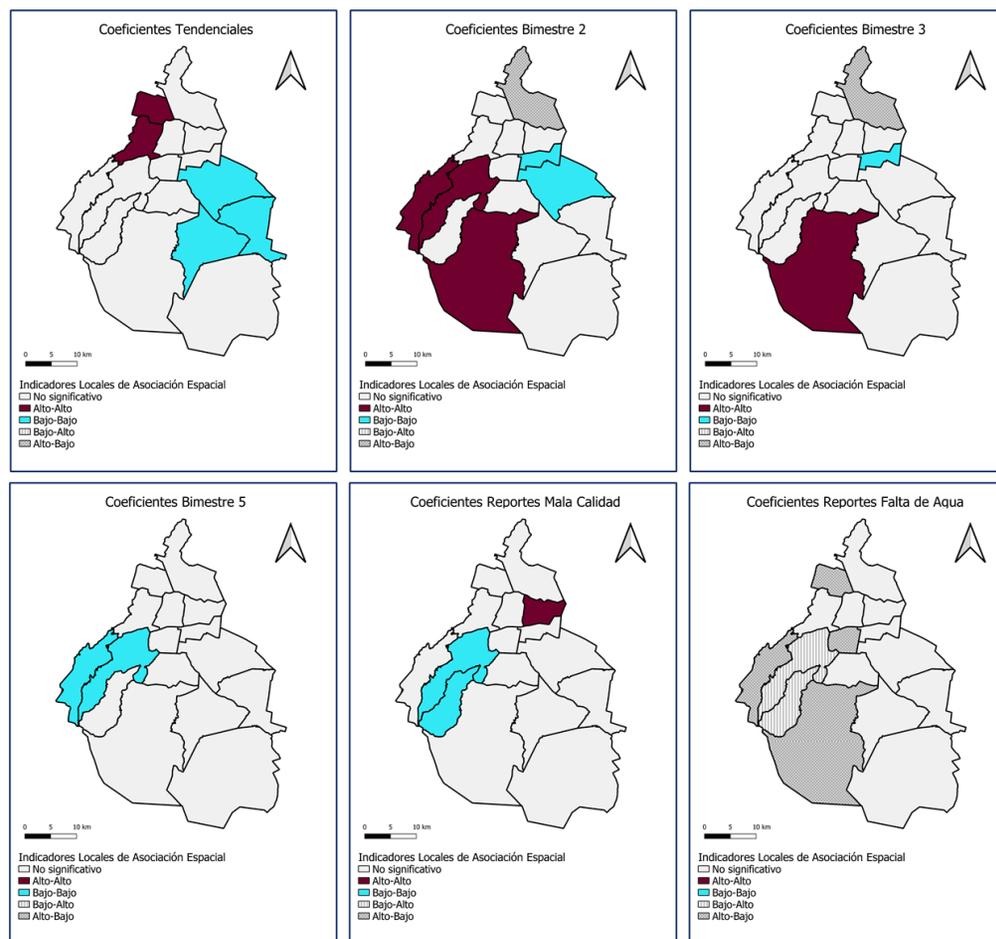
n = 1,056. Los valores calculados para la t de Student se encuentran entre paréntesis debajo de los coeficientes. * Coeficientes estimados como porcentaje

Los valores de la R^2 de los modelos estimados para el uso no doméstico (Tabla 5), fueron los más bajos de los tres usos, siendo Milpa en donde hubo mejor ajuste con 0.82 mientras que en Venustiano Carranza fue de 0.17. Este resultado plantea que el uso no doméstico no responde bien a este tipo de variables para su explicación. En la sección de Anexo aparecen las gráficas donde se comparan los valores predichos con los medidos, así como las estadísticas descriptivas de los porcentajes obtenidos de dicha comparación (Figuras 3-5 y Tablas 12-14). En el material expuesto en esa sección, se observa que en algunos casos el ajuste del modelo fue bueno y en otros casos se deben explorar otras variables para mejorar las predicciones (principalmente en el uso no doméstico).

En la Figura 1 (uso doméstico) y en la Figura 2 (uso mixto y no doméstico) aparecen los resultados del análisis LISA para los coeficientes que tuvieron una I de Moran significativa. Los clústeres espaciales en rojo escarlata corresponden a los valores altos y en azul claro a los valores bajos. Destaca el patrón espacial de los coeficientes del componente tendencial para los usos doméstico y mixto, ya que exhiben una división entre las alcaldías del oriente y las del poniente de la ciudad. Este resultado muestra los coeficientes negativos con valores más cercanos al cero en las alcaldías marcadas con rojo escarlata; esto implica una menor reducción del consumo de agua en estas zonas de la ciudad conforme pasa el tiempo, en comparación con las alcaldías del oriente que aparecen en azul claro.

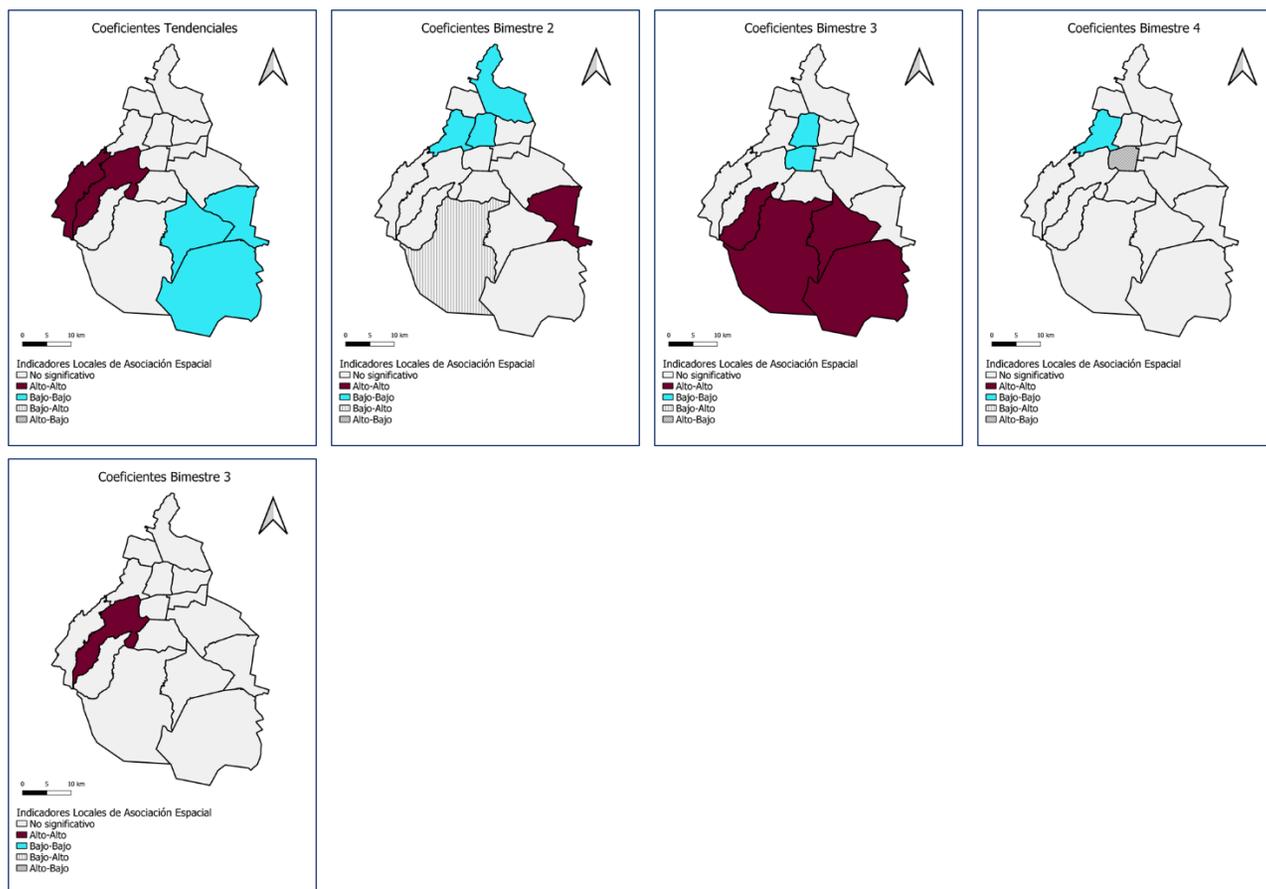
En cuanto al uso doméstico, las alcaldías del sur poniente de la ciudad tienden a mostrar un patrón estacional y espacial significativo, en donde se agrupan coeficientes con valores altos para los bimestres 2 y 3, mientras que en el bimestre 5 son valores bajos. Por su parte, los reportes de mala calidad muestran valores bajos para Magdalena Contreras y Álvaro Obregón y altos para Venustiano Carranza. La variable de reportes de falta de agua muestra clústeres espaciales importantes en el sur poniente, que coinciden con la zona montañosa de la ciudad; estos coeficientes exhiben un patrón de dispersión espacial dado el valor negativo de la I de Moran. En cuanto a los patrones estacionales de los coeficientes que explican el uso mixto de agua, muestran una división norte-sur, se agrupan valores bajos en el norte y valores altos en el sur. Finalmente, para el uso no doméstico, solamente la alcaldía de Álvaro Obregón tuvo un valor alto para el bimestre 3. (Véase Mapa de referencia en la Nota complementaria 2).

Figura 1 Análisis Local de Asociación Espacial (LISA) para los coeficientes del uso doméstico bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México.



Nota: los coeficientes con valores altos agrupados aparecen en rojo escarlata (Alto-Alto). En azul claro se muestran los coeficientes bajos agrupados (Bajo-Bajo). Los achurados muestran coeficientes con valores bajos rodeados de valores altos (Bajo-Alto) y viceversa (Alto-Bajo). (Véase Mapa de referencia en la Nota complementaria 2).

Figura 2 Análisis Local de Asociación Espacial (LISA) para los coeficientes del uso mixto (arriba) y el uso no doméstico (abajo) bimestral de agua en las alcaldías de la Ciudad de México.



Nota: los coeficientes con valores altos agrupados aparecen en rojo escarlata (Alto-Alto). En azul claro se muestran los coeficientes bajos agrupados (Bajo-Bajo). Los achurados muestran coeficientes con valores bajos rodeados de valores altos (Bajo-Alto) y viceversa (Alto-Bajo). (Véase Mapa de referencia en la Nota complementaria 2).

Los resultados de la demanda urbana bimestral de agua estimada para las alcaldías de la Ciudad de México se exponen en la Tabla 6 en m³/s. Esta información contempla el componente medido de los tres usos del agua, a través del pronóstico generado por los modelos descritos en este apartado y cuyo análisis de ajuste aparece en la sección de Anexo. Este cálculo, también incluye la estimación del agua no contabilizada mediante los coeficientes beta aplicados a los usuarios sin medidor. Las alcaldías de Iztapalapa, Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Álvaro Obregón, Miguel Hidalgo y Coyoacán son las que tienen una demanda bimestral de agua que en su conjunto comprende alrededor del 62% del total que se utiliza en la CDMX.

Tabla 6 Demanda urbana bimestral de agua estimada para las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

Alcaldía	Bimestre 1 (m ³ /s)	Bimestre 2 (m ³ /s)	Bimestre 3 (m ³ /s)	Bimestre 4 (m ³ /s)	Bimestre 5 (m ³ /s)	Bimestre 6 (m ³ /s)	Porcentaje con respecto de CDMX total
Iztapalapa	2.12	2.14	2.13	2.13	2.09	2.08	13.06
Gustavo A. Madero	2.02	2.08	2.07	2.10	2.05	2.02	12.70
Cuauhtémoc	1.68	1.72	1.72	1.75	1.73	1.73	10.63
Álvaro Obregón	1.53	1.60	1.60	1.58	1.51	1.52	9.61
Miguel Hidalgo	1.39	1.45	1.45	1.45	1.38	1.40	8.77
Coyoacán	1.19	1.22	1.22	1.22	1.19	1.18	7.43
Benito Juárez	0.97	1.00	1.00	1.02	0.99	0.99	6.14
Tlalpan	0.94	0.98	0.98	0.98	0.93	0.94	5.92
Venustiano Carranza	0.89	0.91	0.91	0.94	0.91	0.90	5.62
Azcapotzalco	0.81	0.84	0.83	0.85	0.83	0.84	5.14
Iztacalco	0.71	0.73	0.73	0.75	0.71	0.71	4.47
Xochimilco	0.42	0.43	0.44	0.43	0.42	0.41	2.62
Magdalena Contreras	0.41	0.42	0.43	0.42	0.40	0.41	2.56
Cuajimalpa	0.38	0.40	0.40	0.39	0.38	0.39	2.41
Tláhuac	0.38	0.39	0.39	0.39	0.38	0.38	2.38
Milpa Alta	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.52
CDMX total	15.93	16.40	16.41	16.48	15.98	16.00	100.00

Los resultados del análisis de varianza de un factor para la demanda urbana de agua estimada bimestral promedio, en cada una de las 16 alcaldías, durante el periodo 2008-2018 tuvieron un valor calculado de F menor al valor de F crítica con un intervalo de confianza

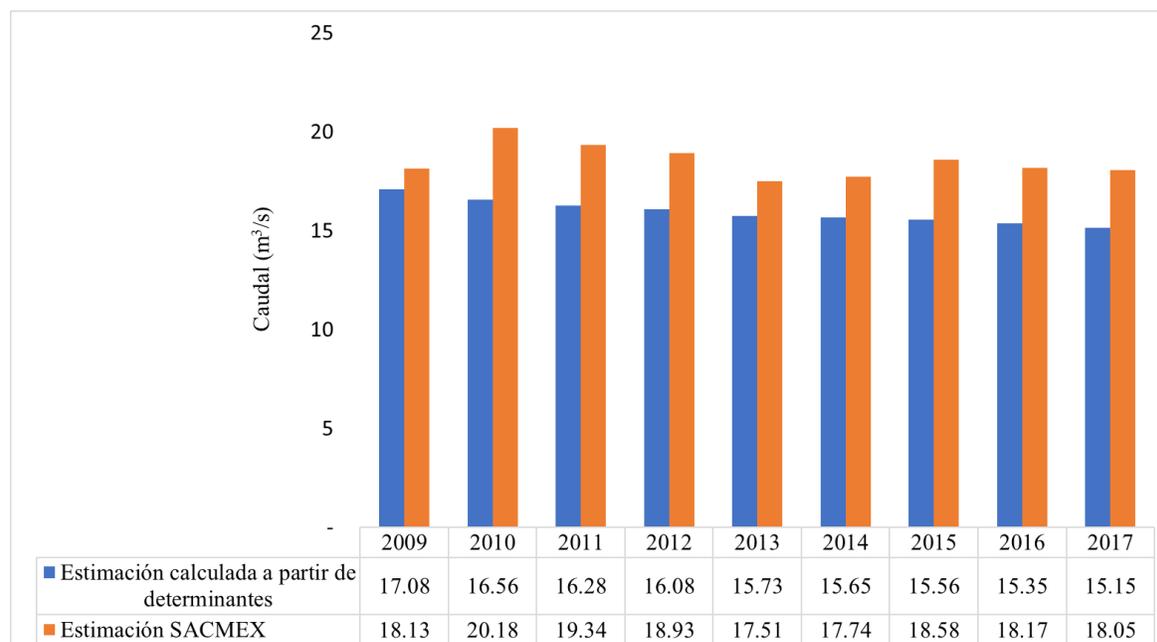
del 95%, por lo que se concluye que no existe diferencia significativa entre el consumo bimestral a lo largo del periodo de estudio (Tabla 7). Este resultado sugiere que los usos exteriores de agua no modifican de forma significativa la demanda urbana de agua a nivel de alcaldías.

Tabla 7 Resultado del análisis de varianza de un factor para la demanda urbana de agua bimestral estimada en las alcaldías de la CDMX para el periodo 2008-2018.

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Bimestre 1	16	15.93	1.00	0.38		
Bimestre 2	16	16.40	1.03	0.39		
Bimestre 3	16	16.41	1.03	0.39		
Bimestre 4	16	16.48	1.03	0.40		
Bimestre 5	16	15.98	1.00	0.38		
Bimestre 6	16	16.00	1.00	0.37		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.02	5	0.00	0.01	1.00	2.32
Dentro de los grupos	34.74	90	0.39			
Total	34.76	95				

Por otro lado, en la Figura 3 se están los datos estimados para la demanda urbana de agua (componente medido y agua no contabilizada) en comparación con los publicados en SACMEX (2019a:62). Existe una subestimación promedio de 2.58 m³/s entre la estimación presentada en esta investigación y los datos que expone el SACMEX.

Figura 3 Comparación global de la demanda urbana estimada con los datos expuestos en SACMEX (2019a:62).



Las distribuciones espaciales para la intensidad de los usos doméstico, mixto y no doméstico, acompañadas por los resultados de los análisis LISA calculados con una aleatorización de 999 permutaciones, aparecen en la Figura 4. En ella se aprecia que el uso doméstico posee el patrón espacial con mayor significancia y magnitud (I de Moran 0.47, valor de p 0.002), seguido por el uso mixto (I de Moran 0.257, valor de p 0.026) y luego por el uso no doméstico (I de Moran 0.168, valor de p 0.015). En general, los usos doméstico y mixto exhiben un patrón espacial oriente-poniente. Para el caso del uso doméstico, los valores bajos se agrupan en el oriente y los altos en el poniente. La intensidad de uso mixto muestra valores altos en el centro-poniente y bajos en el sur-poniente; mientras que la intensidad de uso no doméstico de agua sólo tiene un valor bajo en la alcaldía de Iztacalco.

A partir de los datos expuestos en la Tabla 8, se observa que en la alcaldía de Cuajimalpa la intensidad de uso doméstico presenta un valor alto y espacialmente significativo, que se caracteriza por densidad de vivienda baja y tamaño del hogar alto. En contraste, los valores bajos de intensidad para este uso se conjuntan en las alcaldías de Iztapalapa, Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta, que se caracterizan por densidad baja de vivienda y tamaño del hogar medio (3.45 habitantes por vivienda). En cuanto al resto de las

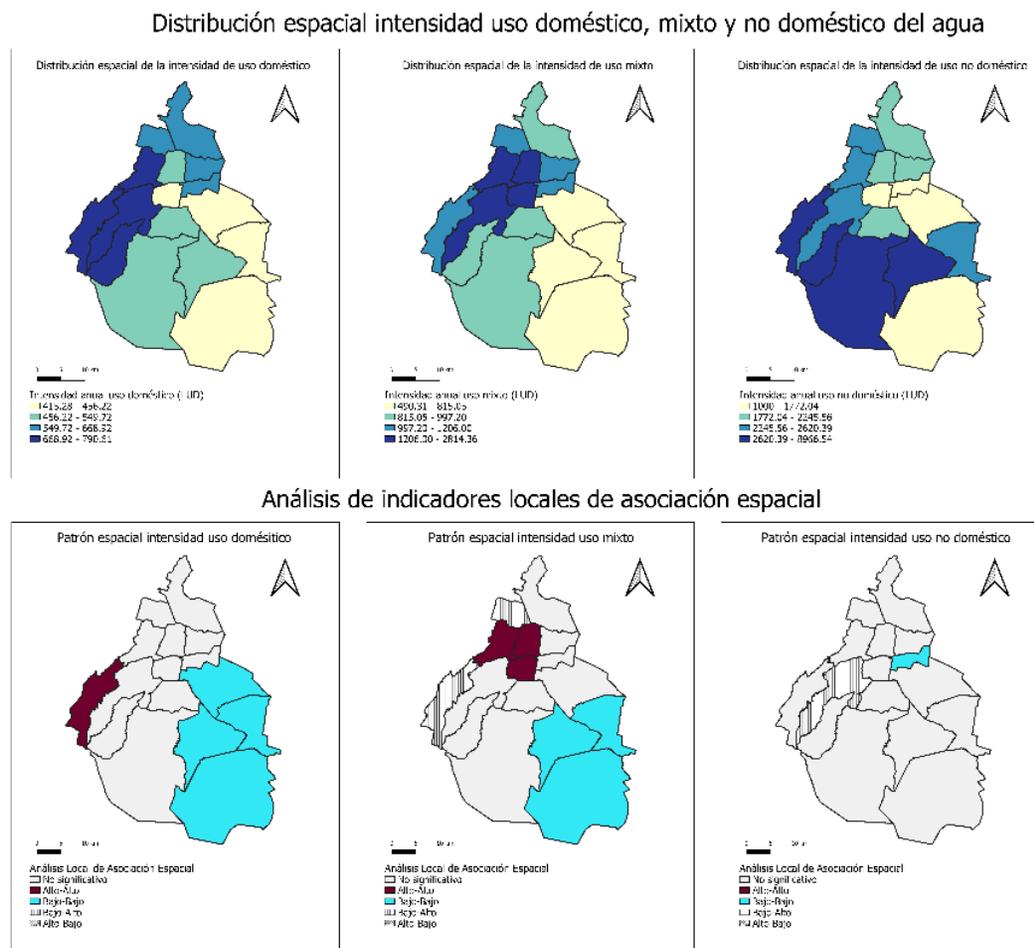
alcaldías no presentaron un patrón espacial significativo; en ellas se observa alta densidad de vivienda y tamaño del hogar bajo. Por otra parte, destaca que la zona de Cuajimalpa también se caracteriza por baja densidad de unidades económicas y alta cantidad de personal ocupado por unidad.

Tabla 8 Características de los clústeres espaciales de la intensidad de los usos doméstico, mixto y no doméstico de agua en las alcaldías de la Ciudad de México.

Uso	Clúster espacial	Densidad de vivienda (viviendas/ha)	Tamaño del hogar (habitantes/vivienda)	Densidad de unidades económicas (unidades/ha)	Población empleada por unidad (empleados/unidad)
Doméstico	No significativo	40.37	3.06	12.57	12.47
	Alto-Alto	15.03	4.12	4.62	20.46
	Bajo-Bajo	25.33	3.45	7.84	3.11
Mixto	No significativo	36.54	3.31	9.87	7.35
	Alto-Alto	51.50	2.59	20.90	20.28
	Bajo-Bajo	19.32	3.44	6.11	2.61
	Bajo-Alto	27.83	3.55	7.13	21.27
No Doméstico	No significativo	34.31	3.21	11.08	10.48
	Bajo-Bajo	50.83	3.23	12.98	5.79
	Bajo-Alto	29.21	3.48	6.19	17.57
Ciudad de México (promedio)		35.03	3.23	10.90	10.63

En cuanto a la intensidad del uso mixto, deben tomarse en cuenta tanto los datos de vivienda como los de unidades económicas como consecuencia de su definición. El clúster con valores altos se caracteriza por alta densidad y bajo tamaño de hogar, lo que sugiere cierto grado de ineficiencia en los usos interiores, similar a lo que ocurre con las unidades económicas y la población ocupada. El clúster Bajo-Alto parece mostrar una extensión de la dinámica del clúster Alto-Alto. En cuanto al clúster Bajo-Bajo, coincide casi en su totalidad con el uso doméstico, además de contar con densidad baja de viviendas y tamaño del hogar por encima del promedio de la ciudad, lo mismo ocurre con la dinámica de las unidades económicas y el personal ocupado; esto puede atribuirse a la condición de zona rural en estas alcaldías. Finalmente, el clúster Bajo-Bajo del uso no doméstico muestra alta densidad de unidades económicas y un número bajo de personal ocupado por unidad.

Figura 4 Análisis espacial de la intensidad del uso doméstico, mixto y no doméstico del agua en las alcaldías de la Ciudad de México.



Nota: los valores altos agrupados aparecen en rojo escarlata (Alto-Alto). Los valores bajos agrupados se muestran en azul claro (Bajo-Bajo). Los achurados designan valores bajos rodeados de valores altos (Bajo-Alto) y viceversa (Alto-Bajo). (Véase Mapa de referencia en la Nota complementaria 2).

Discusión

Los resultados del componente tendencial de los tres usos que conforman el componente medido de la demanda urbana de agua, para el periodo 2008-2018, muestran que existe una reducción significativa para los usos doméstico y mixto en prácticamente todas las alcaldías de la Ciudad de México. En paralelo, según los datos de CONAGUA (2013:28)⁷, el crecimiento poblacional de la ciudad tiende a estabilizarse en el tiempo. Esto contrasta con lo expuesto en GDF (2012) y SACMEX (2019a), en donde se enfatiza el tema del crecimiento poblacional con relación al consumo de agua sin tomar en cuenta las dinámicas actuales de la demanda urbana de agua y del comportamiento demográfico en la CDMX.

En este sentido, se debe tener en consideración que los datos poblacionales reportados en CONAGUA (2013:26) para el año 2010, en comparación con los datos censales del año 2020 referenciados en INEGI (2021), muestran un aumento del 4.01% para el total de la población capitalina, sin embargo las alcaldías de Milpa Alta, Cuajimalpa, Benito Juárez y Miguel Hidalgo son las que mostraron mayor incremento poblacional, en un rango de 10 a 20%. De estas cuatro alcaldías, Miguel Hidalgo está entre las que tienen mayor demanda urbana bimestral, al igual que Benito Juárez (Tabla 6). Estas dos alcaldías junto con Cuajimalpa tienen patrones de alta intensidad para los usos mixto y doméstico, respectivamente. Esta situación las pone en un foco de atención importante. Por su parte, Milpa Alta se localiza en el lado contrario del espectro con baja demanda urbana de agua y baja intensidad de uso de agua, sin embargo se localiza en una de las zonas de recarga de los acuíferos de la ciudad. Por estas razones, es importante entender el rol del crecimiento poblacional desde su distribución espacial y también desde su relación con la intensidad de uso del agua.

Con respecto al patrón estacional de la ciudad, resalta que las alcaldías del poniente muestran coeficientes significativos tanto temporales como espaciales; esto puede deberse a la localización del ingreso de los caudales provenientes de fuentes externas, en particular de los sistemas Lerma y Cutzamala (GDF, 2012; Ramos-Bueno y Perevochtchikova, 2020); este punto debe contrastarse con los resultados del análisis de varianza, ya que no hubo diferencias

⁷ En esta publicación se conjuntan los datos censales generados por el INEGI para las delegaciones del Distrito Federal (ahora alcaldías de la CDMX). Adicionalmente, se muestran las proyecciones a cargo del Consejo Nacional de Población y con esta información, se generaron los gráficos de la página 28.

significativas en la demanda bimestral promedio para el periodo 2008-2018. El caso de Cuajimalpa es relevante, porque no muestra un coeficiente tendencial significativo que sugiera la reducción del uso doméstico, además presenta aumento del consumo de agua durante el segundo bimestre, que disminuye hacia el quinto bimestre. Este comportamiento, ligado al patrón espacial de alta intensidad de uso doméstico, a la baja densidad habitacional y al tamaño del hogar alto, la destacan como prioritaria para la gestión de la demanda de agua en torno a los puntos descritos por Brooks (2007). En este caso se requiere hacer un estudio que indague el tipo de actividades en las que se usa el agua en las colonias de esta alcaldía, lo que incluye estudiar a los usuarios finales.

Cabe destacar que los patrones estacionales que se observan en Gustavo A. Madero y Tláhuac pueden estar ligados a la ubicación de los sistemas Chiconautla, Barrientos y Caldera como se muestra en CONAGUA (2013), GDF (2012) y Ramos-Bueno y Perevochtchikova (2020). Estos comportamientos, hacen necesaria la exploración de la dinámica de las fuentes externas en cuanto su temporalidad, además de los sitios que abastecen al interior de la ciudad, sobre todo que según Escolero *et al.* (2016) el sistema Cutzamala es la fuente que presenta mayor grado de vulnerabilidad; además de los retos relativos a la subsidencia y a la condición de cada uno de los sistemas (GDF, 2012; SACMEX, 2019a).

La micromedición es el coeficiente que muestra mayor contribución en comparación con el resto, en particular con aquéllos que caracterizan el acceso al agua y los reportes de fugas. Estos resultados son similares a lo encontrado por Ramos-Bueno *et al.* (2021) para el uso doméstico a nivel colonia, sin embargo resulta importante mencionar que del suministro intermitente no tuvo un papel relevante a nivel de alcaldía medido como el número de días promedio de abasto continuo. Esto puede deberse a los efectos de la estacionalidad del suministro y a la agregación de los datos en este tipo de unidades espaciales que conjuntan diferentes condiciones en su interior.

Pese al nivel de agregación que comprenden las alcaldías como unidades espaciales de análisis, como lo mencionan Jiménez *et al.* (2011), las variables de acceso al agua mostraron una contribución importante para explicar los usos doméstico y mixto, destaca que en algunos casos los signos son positivos; estos casos deben estudiarse a mayor profundidad para dilucidar si los reportes de este tipo de anomalías pueden ayudar a disminuir los niveles

no contabilizados de agua, lo que implicaría una meta de la gestión de la demanda de agua (Baumann y Boland, 1997; Brooks, 2007) o si se trata de un efecto debido al nivel de agregación de la información. Este punto se debe corroborar con otro tipo de medición más allá de lo reportado por los usuarios.

Respecto al uso no doméstico, se deben abordar otro tipo de determinantes para su explicación, ya que las variables utilizadas en este estudio presentaron limitaciones, que se vieron reflejadas en los bajos valores de R^2 en algunas de las alcaldías. Ante esta circunstancia, los datos de intensidad de uso no doméstico deben tomarse con cautela. En este punto, se sugiere utilizar variables desde el censo económico, como el tamaño de establecimientos (INEGI, 2020). Por otro lado, también puede resultar útil relacionar este uso directamente con su esquema tarifario vigente (Revisar Nota complementaria 1).

Los determinantes escogidos para estimar la demanda urbana de agua (componente medido y agua no contabilizada) generaron una subestimación que contrasta con los datos presentados en SACMEX, (2019a:62). La importancia de hacer esta comparación, radica en que los datos presentados por el SACMEX fueron validados mediante 1,142 pruebas de exactitud de los medidores y también a través de la inspección a grandes usuarios. La cercanía de ambos resultados deja ver que la ciudad utiliza un caudal menor a los $31.33 \text{ m}^3/\text{s}$ que se exponen en Ramos-Bueno *et al.* (2021) con base en información del SACMEX. Esta situación resalta la necesidad de reducir los caudales de pérdidas como estrategia principal para la gestión de la demanda (Baumann & Boland, 1997; Brooks, 2007), además de estudiar este componente de la demanda urbana de agua en adición a los otros dos. Un primer paso, consiste en analizar la distribución espacial de los reportes de fugas.

Los patrones espaciales poniente-oriental para la intensidad de los usos doméstico y mixto de agua, ponen de manifiesto lo expresado en Ramos-Bueno y Perevochtchikova (2020) sobre la diferencia entre el uso del agua en las áreas del Suelo de Conservación, en contraste con la zona urbana. Este resultado de intensidad de uso de agua y su relación con la densidad urbana, es similar a lo encontrado por Ramos-Bueno *et al.* (2021) para esta misma zona; sin embargo se debe tener en mente que el aumento de densidad en las alcaldías de Tláhuac, Xochimilco y Milpa Alta implicaría un incremento en la demanda urbana de agua contrario a lo expuesto en los estudios de Wentz y Gober (2007), Chang (2010), Chang *et al.*, 2017 y

Stoker *et al.* (2019). Esta pauta es importante para tomar en cuenta, en el sentido de integración entre la gestión del agua y el desarrollo urbano.

Conclusiones

Se presentó una estimación de demanda urbana bimestral de agua para la Ciudad de México a nivel de alcaldía. Para su cálculo se utilizaron determinantes tendenciales y estacionales que cubren el periodo 2008-2018, acompañados de variables que corresponden a la micromedición, el acceso al agua y los reportes de fugas. Este conjunto de variables resultó útil para explicar los usos doméstico y mixto, caso contrario ocurrió con el uso no doméstico. La estimación de la demanda urbana de agua permitió abordar la intensidad de los tres usos, así como sus patrones espaciales y su caracterización sociodemográfica.

A partir de los resultados expuestos, se observa que los usos exteriores del agua no muestran suficiente relevancia en términos de la demanda urbana de agua en este nivel de agregación, aunque la estacionalidad que muestran los determinantes es relevante para saber cómo evolucionan los requerimientos bimestrales de agua por alcaldía. Este punto debe tomarse en cuenta para entender su relación con la dinámica hídrica de las fuentes de abastecimiento, algo que lleva a entender de forma integrada ambos componentes y que puede funcionar como un marco para evaluar distintas opciones de abastecimiento para la ciudad.

Referencias

- ALDF [Asamblea Legislativa del Distrito Federal]. (2003). Ley de Aguas del Distrito Federal. México, DF: Gobierno del Distrito Federal.
- Anselin, L. (2005). Exploring Spatial Data with GeoDa: A Workbook. Santa Barbara: Center for Spatially Integrated Social Science.
- Arbués, F., García-Valiñas, M., y Martínez-Espiñeira, R. (2003). Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review. *Journal of Socio-Economics*, 32, 81-102. doi: [https://doi.org/10.1016/S1053-5357\(03\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S1053-5357(03)00005-2)

- Bahri, A. (2011). *Integrated Urban Water Management*. Stockholm: Global Water Partnership.
- Baumann, D., y Boland, J. (1997). The Case for Managing Urban Water. In D. Baumann, J. Boland, y W. Hanemann, *Urban Water Demand Management and Planning* (pp. 1-30). Nueva York: Mc Graw Hill.
- Bell, S. (2018). *Urban Water Sustainability. Constructing infrastructure for cities and nature*. Nueva York: Routledge.
- Billings, R., y Jones, C. (2008). *Forecasting Urban Water Demand* (2 ed.). Denver: American Water Works Association.
- Brooks, D. (2007). An Operational Definition of Water Demand. *International Journal of Water Resources Development*, 22(4), 521-528. doi: <https://doi.org/10.1080/07900620600779699>
- Burt, J., Barber, G., y Rigby, D. (2009). *Elementary statistics for geographers* (3rd ed.). Nueva Yrok: Guilford.
- Buzai, G., y Baxendale, C. (2012). *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Ordenamiento territorial. Temáticas de base vectorial*. Buenos Aires: Lugar Editorial.
- Chang, H. (2017). Water Conservation. In D. Richardson (Ed.), *The international encyclopedia of geography : people, the earth, environment, and technology* (pp. 7623-7628). Chichester, West Sussex: Wiley Blackwell.
- Chang, H., Bonnette, M., Stoker, P., Crow-Miller, B., y 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., y Shandas, V. (2010). Spatial variation of Single-Family Residential water consumption in Portland, Oregon. *Urban Geography*, 31(7), 953-972. doi: <https://doi.org/10.2747/0272-3638.31.7.953>

- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2013). Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Edición 2013. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2019). Biblioteca Digital de MAPAS. (S. d. Naturales, Editor) Recuperado el 26 de 10 de 2021, de Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado. Libro 4: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>
- Domene, E., y 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., y Suffet, I. (2000). Sustainability of least cost policies for meeting Mexico City's future water demand. *Water Resources Research*, 36(8), 2321-2339. doi: <https://doi.org/10.1029/1999WR900234>
- Escolero, O., Kraslisch, S., Martínez, S., y 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.
- GDF [Gobierno del Distrito Federal]. (2012). Programa de Gestión Integral de los Recursos Hídricos, Visión 20 Años. Ciudad de México: Secretaría del Medio Ambiente, Sistemas de Agua de la Ciudad de México.
- House-Peters, L., y Chang, H. (2011). Urban water demand modeling: Review of concepts, methods and organizing principles. *Water Resources Research*, 47(5). doi: <https://doi.org/10.1029/2010WR009624>
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. (16 de 07 de 2020). Censos Económicos 2019. Obtenido de Datos abiertos: https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Datos_abiertos

- Jiménez, B., Gutiérrez, R., Marañón, B., y González, A. (2011). Evaluación de la política de acceso al agua potable en el Distrito Federal. México: Evalúa DF-PUEC-UNAM.
- Kontokosta, C., y 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.05.007>
- Martínez, M. (2004). La participación de la empresa privada en la gestión de servicios de agua en el Distrito Federal. In H. Libreros, R. López, M. Martínez, J. Montesillos, G. Ortiz, y A. Quiñones, *Gestión del agua en el Distrito Federal retos y propuestas* (pp. 15-57). México, DF: PUEC-UNAM.
- Martínez, S., Escolero, O., y 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. doi: <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0010-y>
- Mitchell, G. (2006). Applying Integrated Urban Water Management Concepts: A Review of Australian Experience. *Environmental Management*, 37(5), 589-605. doi: <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0252-1>
- Ostertagova, E., y Ostertag, O. (2015). Regression Analysis and Seasonal Adjustment of Time Series. *Journal of Automation and Control*, 3(3), 118-121.
- Pinkham, R. (1999). 21st Century Water Systems: Scenarios, Visions, and Drivers. Retrieved 12 15, 2016, from https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/05/RMI_Document_Repository_Public-Reports_W99-21_21CentWaterSys.pdf
- Ramos-Bueno, A., y Perevochtchikova, M. (2020). Hacia la gestión integrada del agua urbana en la Ciudad de México: análisis espacial del abasto y uso del agua (2008-2013). En O. Monroy Hermosillo, *Acciones metropolitanas para la gestión sustentable del agua* (págs. 259-276). Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana-CRAM-El Colegio de México-ANUIES.

- Ramos-Bueno, A., Perevochtchikova, M., y Chang, H. (2021). Socio-spatial analysis of residential water demand in Mexico City. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(2), 59-110. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-02>
- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2019a). Librería Virtual. Diagnósticos, logros y desafíos SACMEX 2018. Recuperado el 12 de 05 de 2019, de <http://data.sacmex.cdmx.gob.mx/aplicaciones/libreria/biblioteca/libros/2018/diagnostico-logros-y-desafios-2018.pdf>
- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2019b). Portal de transparencia. Solicitud de información pública 0324000163219, sobre horarios y días de tandeo a las colonias de la CDMX. Obtenido de Sistema de Solicitudes de Información, INFOMEX CDMX: <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>
- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2020). Portal de transparencia. Solicitud de información pública 0324000061920 sobre reportes de mala calidad, fugas y falta de agua. Obtenido de Sistema de Solicitudes de Información, INFOMEX CDMX: <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>
- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2021a). Portal de transparencia. Solicitud de información pública 0324000032821 sobre consumo facturado y pagado de agua. Obtenido de Sistema de Solicitudes de Información, INFOMEX CDMX: <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>
- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2021b). Portal de transparencia. Solicitud de información pública 0324000032921, usuarios con y sin medidor. Obtenido de Sistema de Solicitudes de Información, INFOMEX CDMX: <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>
- Saurí, D. (2013). Water Conservation: Theory and Evidence in Urban Areas of the Developed World. *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 227-248. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-013113-142651>
- Soto, G., y Herrera-Pantoja, M. (2016). Implications of Climate Change on Water Resources Management in Megacities in Developing Countries: Mexico City Case Study.

- Environmental Management and Sustainable Development, 5(1), 47-68. doi: <https://doi.org/10.5296/emsd.v5i1.8807>
- Stoker, P., Chang, H., Wentz, G., Crow-Miller, B., Jehle, G., y Bonnette, M. (2019). Building Water-Efficient Cities. Journal of the American Planning Association, 85(4), 511-524. doi: <https://doi.org/10.1080/01944363.2019.1638817>
- Wentz, E., y Gober, P. (2007). Determinants of Small-Area Water Consumption for the City of Phoenix, Arizona. Water Resources Management, 21, 1849-1863.
- Wooldrige, J. (2013). Introductory Econometrics. A Modern Approach (5ta ed.). Mason, OH, USA: South-Western, Cengage Learning.
- Worthington, A., y Hoffman, M. (2008). An Empirical Survey of Residential Water Demand Modelling. Journal of Economic Surveys, 22(5), 842-871. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1467-6419.2008.00551.x>

Anexo

Tabla 9 Uso doméstico, mixto y no doméstico en las alcaldías de la Ciudad de México (promedio bimestral 2008-2018).

Alcaldía	Uso doméstico (miles de m ³)	Uso mixto (miles de m ³)	Uso no doméstico (miles de m ³)
Álvaro Obregón	4,083.09	308.42	810.82
Azcapotzalco	2,165.83	351.65	662.71
Benito Juárez	2,862.07	434.18	923.50
Coyoacán	2,881.24	189.29	655.55
Cuajimalpa	932.81	54.07	192.52
Cuauhtémoc	3,019.64	810.86	2,080.43
Gustavo A. Madero	4,528.58	756.53	894.84
Iztacalco	2,014.02	310.33	329.03
Iztapalapa	4,049.08	537.68	713.17
Magdalena Contreras	578.36	36.93	114.76
Miguel Hidalgo	3,290.80	423.73	1,487.59
Milpa Alta	67.76	13.81	14.66
Tláhuac	773.22	98.02	115.77
Tlalpan	1,876.54	108.55	629.13
Venustiano Carranza	1,885.53	405.26	428.71
Xochimilco	808.46	127.27	173.96
CDMX, promedio (todas las alcaldías)	2,238.56	310.41	639.20

Fuente: elaboración propia con base en los datos de SACMEX, (2021a).

Tabla 10 Usuarios domésticos, mixtos y no domésticos con medidor y sin medidor en las alcaldías de la Ciudad de México (promedio bimestral 2008-2018).

Alcaldía	Usuarios domésticos con medidor	Usuarios domésticos sin medidor	Usuarios mixtos con medidor	Usuarios mixtos sin medidor	Usuarios no domésticos con medidor	Usuarios no domésticos sin medidor
Álvaro Obregón	100,655.21	33,498.61	4,451.45	1,089.24	6,180.05	1,015.24
Azcapotzalco	68,441.92	18,036.62	5,562.74	662.17	5,075.09	964.55
Benito Juárez	108,531.91	32,630.24	4,696.21	674.36	14,832.58	2,240.91
Coyoacán	94,725.24	53,603.59	3,071.52	3,433.65	5,766.24	1,862.05
Cuajimalpa	21,329.58	11,006.14	889.27	459.02	1,128.89	459.15
Cuauhtémoc	122,249.35	34,741.53	6,721.74	929.85	23,289.33	4,787.61
Gustavo A. Madero	143,569.76	61,710.94	14,620.94	3,885.35	8,420.80	2,393.77
Iztacalco	57,992.74	21,050.79	5,222.73	717.80	4,224.95	1,198.23
Iztapalapa	132,245.45	203,958.91	10,741.36	12,828.12	9,950.00	6,127.71

Magdalena Contreras	13,178.12	21,498.95	621.47	1,054.80	869.55	256.56
Miguel Hidalgo	88,718.27	19,596.91	3,480.62	399.18	10,252.38	1,126.76
Milpa Alta	2,723.24	10,773.33	452.47	756.85	219.64	203.45
Tláhuac	30,286.33	33,761.86	2,641.94	1,827.80	956.08	651.95
Tlalpan	58,380.85	54,831.12	1,966.06	3,033.55	3,651.71	1,170.83
Venustiano Carranza	56,238.15	37,864.97	6,228.76	1,090.76	5,238.24	1,947.23
Xochimilco	29,166.79	30,379.68	3,363.41	1,314.83	1,481.14	768.47
CDMX, promedio (todas las alcaldías)	70,527.06	42,434.01	4,670.79	2,134.83	6,346.04	1,698.40

Fuente: elaboración propia con base en los datos de SACMEX, (2021b).

Tabla 11 Reportes de falta de agua, de fugas, de mala calidad y días de suministro continuo en las alcaldías de la Ciudad de México (promedio bimestral 2008-2018).

Alcaldía	Reportes de falta de agua	Reportes de fugas	Reportes de mala calidad	Días de suministro continuo
Álvaro Obregón	891.33	974.36	22.88	40.23
Azcapotzalco	455.64	245.12	29.48	60.00
Benito Juárez	1,078.17	278.89	11.14	60.00
Coyoacán	983.14	875.09	43.02	25.71
Cuajimalpa	203.38	163.91	21.15	23.35
Cuauhtémoc	985.61	252.24	10.47	60.00
Gustavo A. Madero	852.38	642.03	19.33	60.00
Iztacalco	353.83	198.32	22.48	60.00
Iztapalapa	1,249.97	665.89	67.83	32.02
Magdalena Contreras	279.35	304.77	1.98	27.32
Miguel Hidalgo	552.58	515.00	25.26	60.00
Milpa Alta	32.82	32.45	7.59	39.05
Tláhuac	239.06	146.77	29.65	29.24
Tlalpan	1,099.36	649.86	49.82	18.34
Venustiano Carranza	411.09	143.42	24.89	60.00
Xochimilco	268.70	252.76	49.67	23.74
CDMX (todas las alcaldías)	621.02	396.31	27.29	42.44

Fuente: elaboración propia con base en los datos de SACMEX, (2019b) y (2020).

Figura 5 Comparación de datos medidos bimestrales y datos predichos para el uso doméstico en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

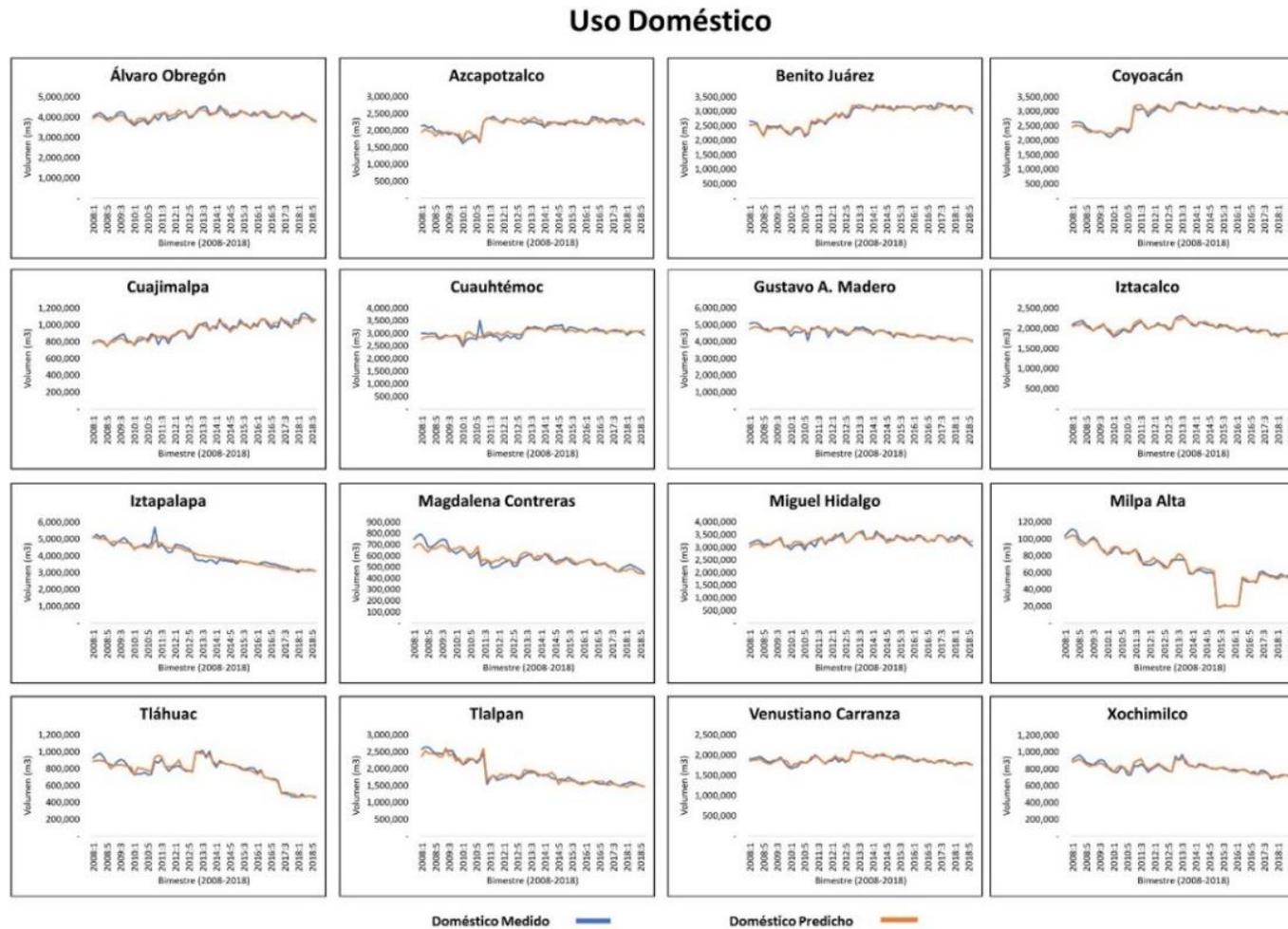


Figura 6 Comparación de datos medidos bimestrales y datos predichos para el uso mixto en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

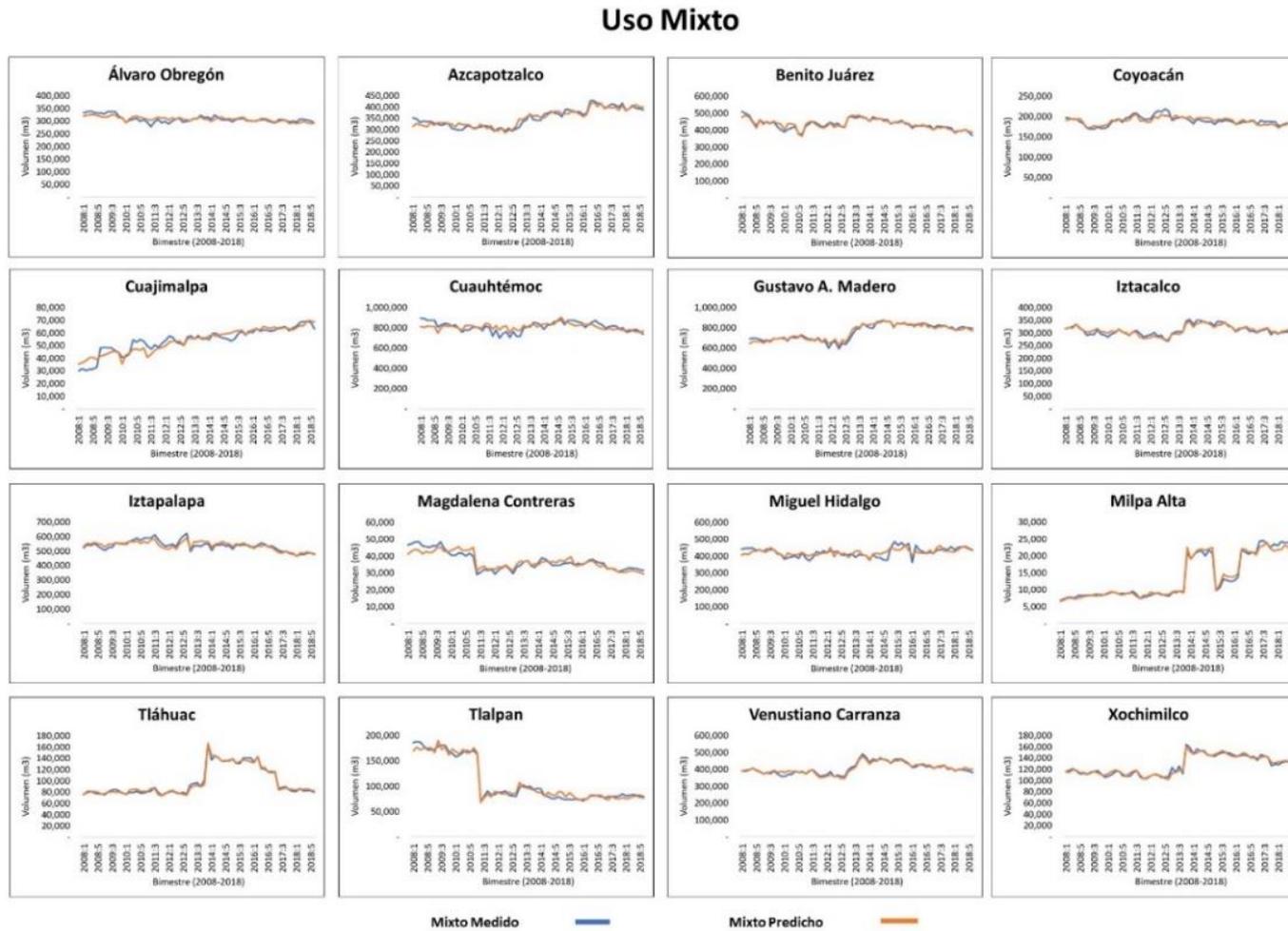


Figura 7 Comparación de datos medidos bimestrales y datos predichos para el uso no doméstico en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

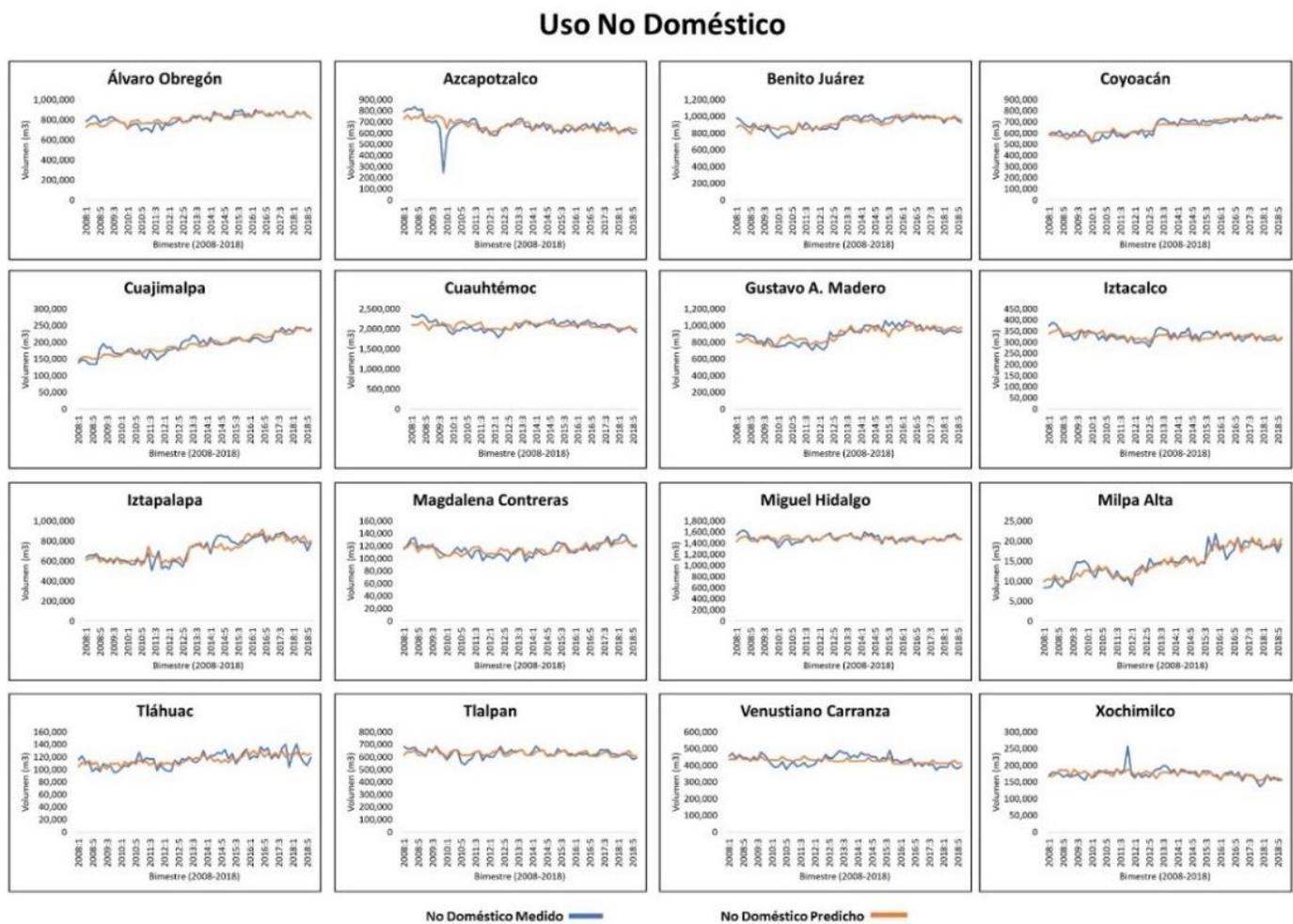


Tabla 12 Estadísticas descriptivas de la comparación entre los valores predichos y medidos para el uso doméstico en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

Tipo de Uso	Alcaldía	Mínimo (%)	Promedio (%)	Máximo (%)	Desviación Estándar (%)
Uso Doméstico	Álvaro Obregón	95.49	100.04	106.70	2.74
	Azcapotzalco	91.23	100.08	113.74	3.99
	Benito Juárez	94.73	100.02	104.67	2.16
	Coyoacán	94.71	100.03	105.94	2.61
	Cuajimalpa	93.17	100.05	110.89	3.19
	Cuauhtémoc	80.85	100.09	109.30	4.30
	Gustavo A. Madero	93.45	100.04	109.24	2.87
	Iztacalco	95.84	100.02	104.44	1.92
	Iztapalapa	86.11	100.10	110.28	4.39
	Magdalena Contreras	88.15	100.15	112.00	5.59
	Miguel Hidalgo	94.82	100.04	108.27	2.69
	Milpa Alta	93.46	100.08	110.66	3.98
	Tláhuac	91.81	100.09	110.36	4.22
	Tlalpan	91.78	100.08	109.66	4.02
	Venustiano Carranza	96.58	100.02	106.45	1.89
Xochimilco	94.93	100.05	108.35	3.10	

Tabla 13 Estadísticas descriptivas de la comparación entre los valores predichos y medidos para el uso mixto en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

Tipo de Uso	Alcaldía	Mínimo (%)	Promedio (%)	Máximo (%)	Desviación Estándar (%)
Uso Mixto	Álvaro Obregón	93.78	100.05	109.02	3.13
	Azcapotzalco	89.61	100.06	111.65	3.99
	Benito Juárez	93.31	100.03	108.60	2.59
	Coyoacán	91.62	100.06	106.82	3.41
	Cuajimalpa	81.86	100.42	129.74	9.45
	Cuauhtémoc	90.14	100.11	111.70	4.77
	Gustavo A. Madero	92.89	100.03	106.51	2.64
	Iztacalco	95.51	100.03	106.01	2.46
	Iztapalapa	93.51	100.05	107.30	3.20
	Magdalena Contreras	88.23	100.18	113.40	6.00
	Miguel Hidalgo	90.31	100.13	113.50	5.08
	Milpa Alta	87.74	100.14	110.85	5.37
	Tláhuac	91.22	100.05	106.85	3.18
	Tlalpan	91.29	100.19	118.14	6.35

	Venustiano Carranza	95.71	100.03	107.59	2.42
	Xochimilco	92.31	100.03	104.46	2.54

Tabla 14 Estadísticas descriptivas de la comparación entre los valores predichos y medidos para el uso no doméstico en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

Tipo de Uso	Alcaldía	Mínimo (%)	Promedio (%)	Máximo (%)	Desviación Estándar (%)
Uso No Doméstico	Álvaro Obregón	90.30	100.09	112.89	4.38
	Azcapotzalco	88.84	103.15	297.10	24.93
	Benito Juárez	88.69	100.13	113.23	5.15
	Coyoacán	91.04	100.12	113.52	4.97
	Cuajimalpa	83.36	100.30	117.74	7.27
	Cuauhtémoc	90.10	100.12	112.64	4.98
	Gustavo A. Madero	86.93	100.21	113.66	6.52
	Iztacalco	89.56	100.13	109.78	5.11
	Iztapalapa	84.56	100.25	128.16	7.21
	Magdalena Contreras	88.20	100.18	118.57	6.16
	Miguel Hidalgo	91.94	100.05	108.32	3.20
	Milpa Alta	76.09	100.52	129.51	10.30
	Tláhuac	85.57	100.26	119.76	7.38
	Tlalpan	90.19	100.08	113.94	4.04
	Venustiano Carranza	86.83	100.21	115.02	6.52
Xochimilco	73.05	100.23	118.20	6.64	

Capítulo 4. Extracción y demanda urbana de agua a nivel de alcaldía en la Ciudad de México para el periodo 2008-2018

(Texto basado en: Ramos-Bueno, A. y Perevochtchikova, M. (2020). Hacia la gestión integrada del agua urbana en la Ciudad de México: análisis espacial del abasto y uso del agua (2008-2013). En O. Monroy Hermsillo, *Acciones metropolitanas para la gestión sustentable del agua* (págs. 259-276). Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana-CRAM-El Colegio de México-ANUIES).

Resumen

La comprensión conjunta del abasto y la demanda de agua requiere de la exploración de las escalas espaciales en las que tienen lugar. Para ello, la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos ha designado a la cuenca como una unidad principal de estudio, por su parte la Gestión Integrada del Agua Urbana ha resaltado la importancia de comprender los determinantes de la demanda urbana de agua para guiar la toma de decisiones y la planificación con una visión de largo plazo. En este punto, resalta el caso de la Ciudad de México por ser un área urbana cuyo abasto depende de un sistema regional que aporta caudales desde diferentes fuentes. Con el fin de abordar los aportes que tienen estas fuentes y la demanda urbana local de agua, en el presente capítulo se exploraron a nivel de alcaldía la extracción de agua subterránea y superficial, así como la demanda urbana de agua estimada, el balance extracción-demanda y la intensidad de uso del agua. También, se analizaron estos cuatro aspectos según las áreas continuas de abasto externo conformadas por las alcaldías según los sistemas que las abastecen (Sistema Cutzamala, Lerma, PAI Norte y PAI Sur), con el fin de relacionar la demanda local con la visión desde el sistema regional de abasto que caracteriza la gestión del agua de la ciudad. Destaca como prioridad el control de la intensidad de uso de agua en las zonas abastecidas por los sistemas Cutzamala, Lerma y PAI Norte, entre otros resultados.

Introducción

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un paradigma que surgió como respuesta ante los efectos mostrados por la reducción de las fuentes disponibles de agua, su contaminación y la competencia entre usuarios. Por ello, se han planteado diferentes

principios para conciliar y atender estas situaciones, generando tendencias hacia el bienestar social, económico y ambiental; lo que implica llevar a cabo el desarrollo sustentable. En este sentido, los recursos hídricos tienen un rol central en el desarrollo de las sociedades, sin embargo se ha comprendido que la cercanía, disponibilidad o abundancia de los recursos hídricos no implican necesariamente bienestar social. Por estas razones, se deben estudiar coordinadamente las dinámicas tanto de los sistemas naturales como de los sistemas humanos para evaluar y tomar decisiones informadas con visión de largo plazo (GWP, 2000).

En términos espaciales, la integración de las dinámicas de ambos sistemas tiene lugar en las cuencas, que son la unidad primordial para la gestión de los recursos hídricos (GWP, 2000). En su interior, destacan las áreas urbanas en constante crecimiento que generan impactos en los ecosistemas locales y lejanos, dado que la provisión de agua que requieren se intensifica y se cubre con recursos cada vez más distantes (Bell, 2018). Además de esta situación, las áreas urbanas generan grandes cantidades de aguas residuales, que a su vez se convierten en fuentes de contaminación que limitan la disponibilidad de agua potable (GWP, 2000). Estos dos factores plantean un escenario de tormenta perfecta (Saurí, 2013), cuya comprensión requiere de la modificación de los objetivos de la gestión del agua (Pinkham, 1999; Kayaga y Smout, 2011).

Dada la importancia de las ciudades en el ámbito de las cuencas, ha surgido un paradigma más específico para abordar los distintos retos que enfrentan; esta propuesta es la Gestión Integrada del Agua Urbana (GIAU). Este paradigma surge para llevar a cabo el desarrollo sustentable en las ciudades y a su vez plantea alternativas a la gestión tradicional del agua, dado que integra los procesos que la conforman mediante la coordinación de los sectores encargados del suministro, alcantarillado y saneamiento, además del control de las precipitaciones (Bahri, 2011; Tiburcio y Perevochtchikova, 2012; Bell, 2018). Este paradigma se orienta hacia la gestión de la demanda de agua (Pinkham, 1999; Mitchell, 2006).

La GIAU y la GRIH son paradigmas que guían la toma de decisiones y también contemplan la importancia de la adaptación a los contextos locales (GWP, 2000; Bahri, 2011); por ello es primordial la evaluación de los costos y beneficios en términos sociales, económicos, políticos y ambientales de todas las alternativas para el abasto urbano de agua (Baumann y Boland, 1997), destacando la priorización de las fuentes locales (Tiburcio y

Perevochtchikova, 2012) y la integración de los sistemas naturales y humanos en términos espaciales y temporales (House-Peters y Chang, 2011). Entre los principios que se plantean desde la GIAU están: (1) la comprensión de la demanda de agua en forma multifacética según los requerimientos de cantidad y calidad, según las actividades para las que se utilice el agua; además de (2) la integración en términos físicos e institucionales que coordine la gestión del abastecimiento, las aguas residuales y la precipitación (Pinkham, 1999).

El presente capítulo tiene como fin abordar estos dos principios de la GIAU en la Ciudad de México, en el primer caso se enfatiza la relación entre la demanda urbana de agua estimada y su comparación con la extracción de agua subterránea y superficial realizada en las alcaldías de la ciudad para presentar un balance local. En el segundo caso, se explora la integración espacial del abasto y la demanda en términos de los sistemas externos que suministran a las alcaldías y que son operados por diferentes instituciones (federales y locales), además de la comparación del uso de agua que se hace en el Suelo de Conservación (SC) y en el suelo urbano, cuyo fin es destacar la diferencia entre las áreas de provisión y de consumo. Esta integración permite comprender el punto donde se conjuntan el sistema regional de abasto, la demanda urbana de agua y el papel que juega el SC con respecto de la gestión urbana del agua.

La información analizada se obtuvo a través de varias solicitudes de información pública interpuestas en el portal del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), además de algunos datos que se descargaron desde los portales de transparencia.

Se solicitaron datos sobre la extracción de agua subterránea en cada una de las alcaldías de la ciudad (SACMEX, 2021c), además de información sobre los caudales aportados por los manantiales que se ubican en el Suelo de Conservación (SACMEX, 2019d). También se solicitaron los caudales que la CONAGUA entrega al SACMEX mediante los ramales de pozos que conforman el Programa de Acción Inmediata (PAI), tanto en el Norte como en el Sur (CONAGUA, 2021). Se descargaron del portal de transparencia los datos de los aportes provenientes de los sistemas Lerma, Cutzamala y Chiconautla (SACMEX, 2019c), así como de los horarios de suministro de agua en las colonias (SACMEX, 2019b). En el caso de la demanda urbana de agua, se utilizó la estimación expuesta en el capítulo anterior

obtenida a partir de variables que contemplan la temporalidad, la estacionalidad, la micromedición, el acceso al agua y los reportes de fugas.

Dado que las escalas espaciales son un factor fundamental para la comprensión de la gestión del agua y también para la toma de decisiones (House-Peters y Chang, 2011), el análisis que se expone en el presente capítulo contempla, en primer lugar, una visión desde las cuencas de abastecimiento que conforman el sistema regional que cubre la demanda de agua de la Ciudad de México (GDF, 2012). Posteriormente se aborda el nivel de alcaldía para presentar el balance entre la extracción de agua subterránea y superficial que se hace dentro de los límites de la CDMX, en contraste con la demanda urbana de agua estimada. Dado que el abasto de la ciudad contempla fuentes externas a su territorio, se abordan tanto la demanda urbana estimada como la intensidad de uso del agua en función de las alcaldías abastecidas por cada uno de los sistemas externos, según lo reportado en INEGI (2011) y CONAGUA (2013). Finalmente, se exploran las diferencias entre las zonas de provisión y de consumo dentro de la capital mexicana. El periodo de estudio corresponde a los años 2008-2018.

Balance entre el abastecimiento y la demanda urbana de agua estimada en la Ciudad de México

Desde el año de 1996 el Sistema de Aguas de la Ciudad de México cuenta con el título 13DFE100309/26HMGC18 para uso público urbano. De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, este tipo de uso de agua se asigna a los organismos operadores para cubrir el suministro de la población mediante las redes municipales de agua potable (CONAGUA, 2009). Según la información que aparece en el Registro Público de Derechos del Agua a cargo de la Comisión Nacional del Agua, el SACMEX tiene asignados 34.55 m³/s anuales, de los cuales 24.75 m³/s corresponden a 858 aprovechamientos subterráneos y 9.8 m³/s a 18 aprovechamientos superficiales (CONAGUA, 2018). Estos caudales se refieren a la cantidad de aguas nacionales que el SACMEX tiene derecho a utilizar.

La distribución espacial de estos aprovechamientos tiene lugar en tres cuencas pertenecientes a las Regiones Hidrológicas 18 “Balsas” (Sistema Cutzamala); 12 “Lerma Santiago” (Sistema Lerma) y 26 “Pánuco” (Cuenca de México) (CONAGUA, 2018). En ésta última se sitúa la Ciudad de México, donde se distribuye el agua a la que hace referencia el

título de asignación de uso público urbano otorgado al SACMEX. Cabe destacar que las presas del Sistema Cutzamala y los pozos pertenecientes al PAI, ubicados dentro de la Cuenca de México, son operados por el Organismo de Cuenca “Aguas del Valle de México” de la CONAGUA. Con respecto al volumen total almacenado en las presas que componen el Sistema Cutzamala, alrededor del 60% se entrega a la CDMX y el resto se distribuye entre la ciudad de Toluca y los municipios conurbados de la Zona Metropolitana del Valle de México (CONAGUA, 2013).

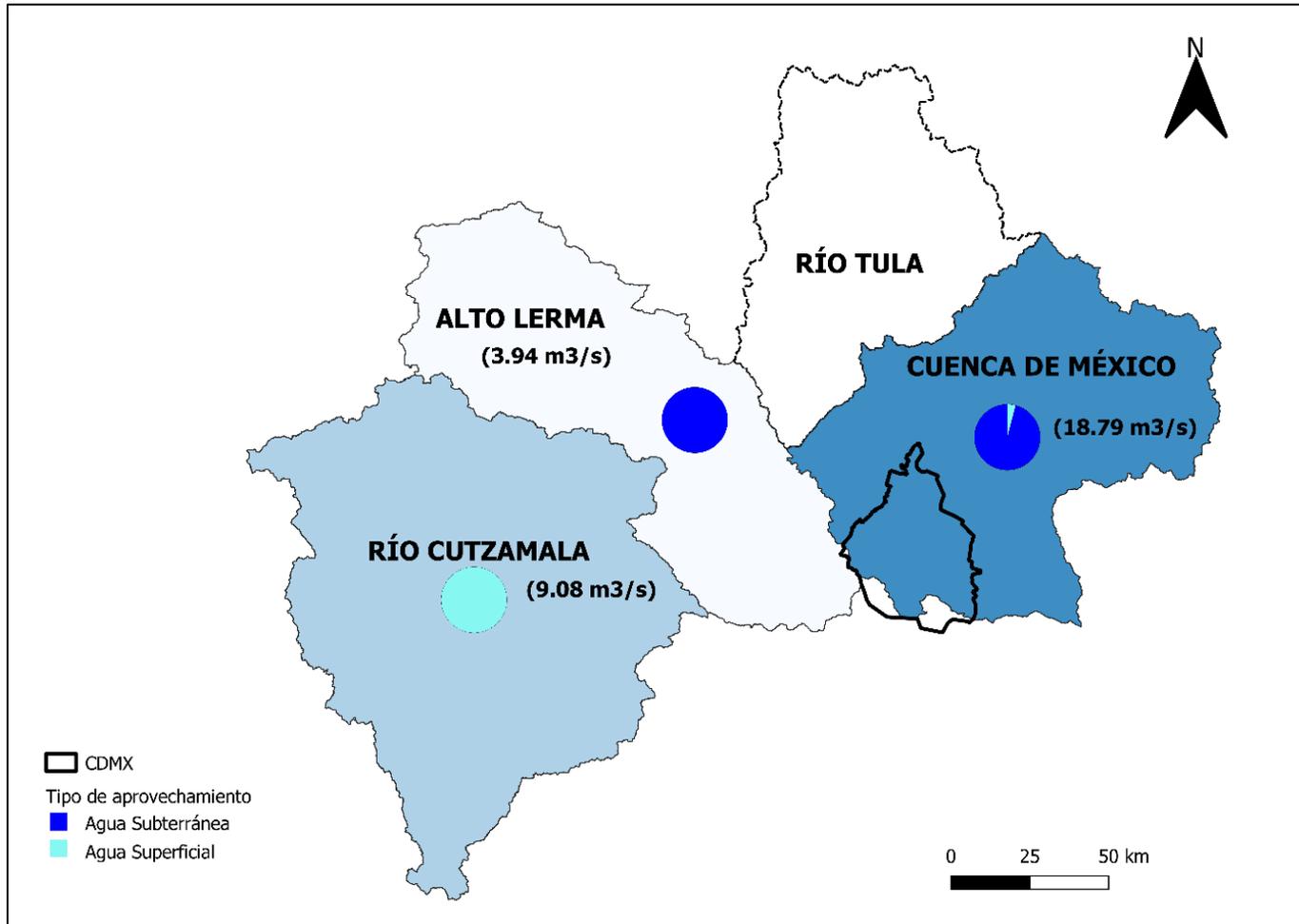
En la Tabla 1 aparecen los caudales asignados con los que cuenta el SACMEX según CONAGUA (2018), incluye la extracción de agua subterránea y el aporte de los manantiales, además de los caudales recibidos desde fuentes localizadas más allá de los límites de la ciudad. Estos aprovechamientos se muestran según su ubicación por cuenca para el periodo 2008-2018 y corresponden a la visión que conjunta el sistema regional de abasto de la CDMX, como se aprecia en el Figura 1.

Tabla 1 Caudales abastecidos a la Ciudad de México durante el periodo 2008-2018.

Cuenca	Título REPDA (m ³ /s)	Caudal extraído 2008-2018 (m ³ /s)	Número de Aprovechamientos	Tipo aprovechamiento	Fuente de información
Cuenca de México	0.80	0.74	17	Superficial	(SACMEX, 2019d)
	20.00	18.79 ⁸	592	Subterráneo	(CONAGUA, 2021) (SACMEX, 2021c)
Alto Lerma	4.75	3.94	266	Subterráneo	(SACMEX, 2019c)
Río Cutzamala	9.00	9.08	1	Superficial	(SACMEX, 2019c)
Total	34.55	31.81	876		(CONAGUA, 2018)

⁸Incluye los caudales del PAI Norte y PAI Sur operados por la Comisión Nacional del Agua

Figura 1 Sistema Regional de Abasto de Agua para la Ciudad de México.



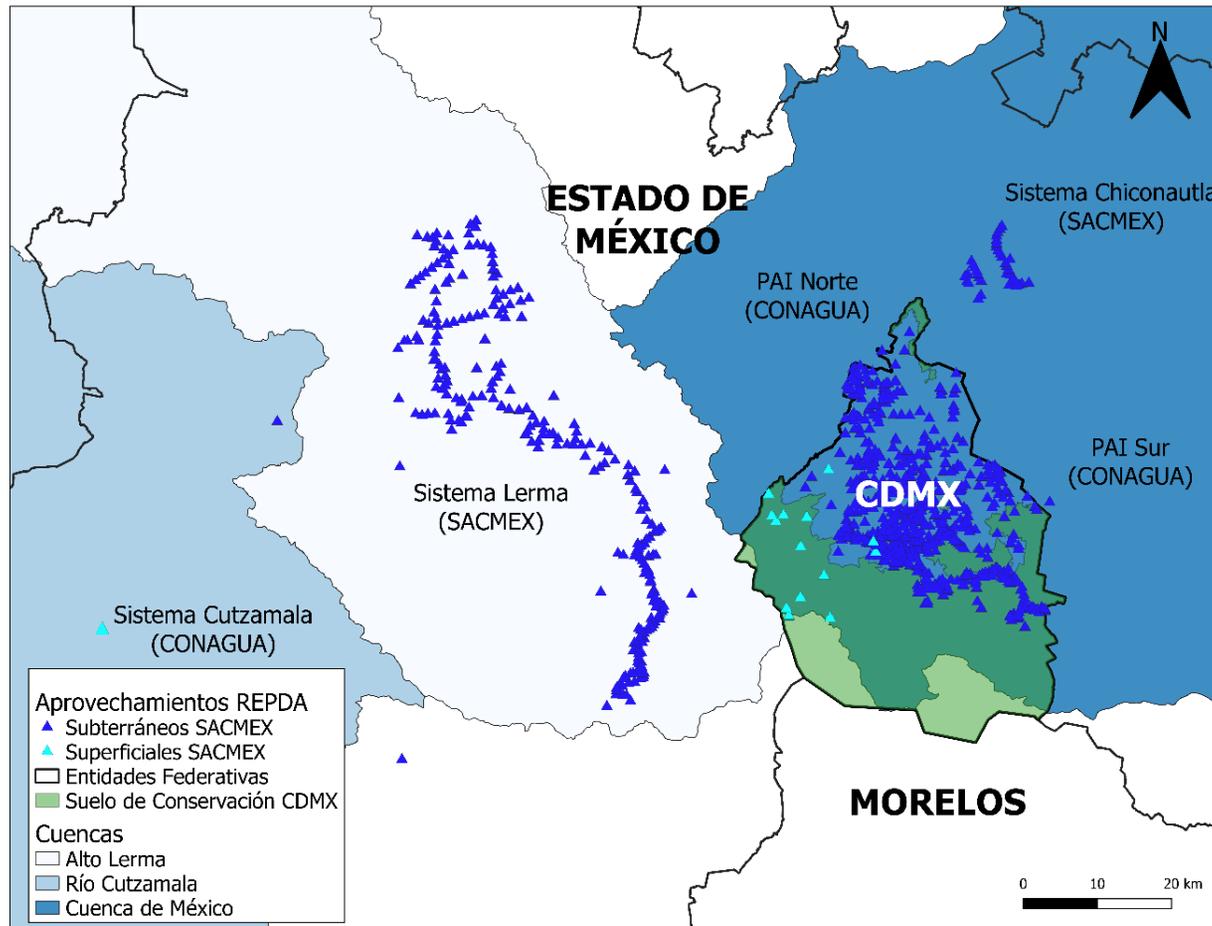
Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2018); (2021) y SACMEX (2019c); (2019d); (2021c).

Este sistema regional se caracteriza por contar con infraestructura que se encuentra operando al límite, además de los impactos ambientales que se han generado por aprovechar estas fuentes y la vulnerabilidad a la que se encuentra expuesto (Martínez *et al.*, 2015; Escolero *et al.*, 2016). Por otra parte, la construcción y la operación de la infraestructura se ha visto acompañada de conflictos sociales y políticos a lo largo de su historia (Perló y González, 2009); lo que genera incertidumbre en una visión de largo plazo.

La extracción que se hace al interior de cada cuenca ocurre de manera diferenciada, según la ubicación de la infraestructura y el momento histórico en que fue construida, por lo que, los impactos ambientales, sociales y económicos han resultado variables espacial y temporalmente. En la Figura 2 aparecen localizados los aprovechamientos a los que hace referencia el título de asignación del SACMEX, según CONAGUA (2018). También se muestra la ubicación aproximada de los ramales del PAI tanto en el norte como en el sur, siguiendo el mapa que aparece en CONAGUA (2013:150). En el caso de los aprovechamientos que están fuera de la CDMX, se anotó entre paréntesis el nombre de la institución que los opera.

La ubicación del PAI en la Figura 2 corresponde a 219 pozos distribuidos en 7 ramales cuya construcción comenzó a partir 1974. En la zona norte se ubican los ramales de Tizayuca-Pachuca, Teoloyucan y Los Reyes-Ferrocarril cuyos caudales se almacenan en el tanque Barrientos, mientras que los provenientes del ramal Los Reyes-Ecatepec llegan al tanque El Risco. En la zona sur se ubican los ramales Tláhuac-Nezahualcóyotl y Mixquic-Santa Catarina que se conectan al tanque Caldera. Adicionalmente, las extracciones del ramal Texcoco-Peñón se derivan hacia una planta presurizadora ubicada en Ciudad Nezahualcóyotl, EDOMEX. El sistema PAI también cuenta con un aprovechamiento superficial que es la Presa Madín. Estos aprovechamientos son operados por la CONAGUA, encargada de entregar agua en bloque al SACMEX, a la Comisión del Agua del Estado de México y a la Comisión de Agua y Alcantarillado de Tizayuca Hidalgo, quienes se encargan de distribuirlos a la población en sus respectivas entidades federativas (CONAGUA, 2013; 2021). Esta anotación se hace, ya que, en ocasiones, estos grupos de pozos se nombran como sistema Barrientos y La Caldera como aparece en GDF (2012:36).

Figura 2 Ubicación de los Sistemas de Abasto de Agua para la Ciudad de México.



Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2013:150); (2018).

Pese a la complejidad que implica la extracción de agua para abastecer a la Ciudad de México, en la Tabla 2 se apuntan los caudales promedio que se recibieron durante el periodo 2008-2018. La exposición de estos datos tiene como fin ubicar las fuentes en un contexto local; por esta razón, los pozos operados por el SACMEX en la CDMX se desglosaron según la alcaldía donde se ubican (SACMEX, 2021c). También se añadieron datos de la solicitud SACMEX (2019c) que contiene los caudales provistos por los sistemas Cutzamala, Lerma y Chiconautla; por su parte en SACMEX (2019d) aparece la información de los caudales aportados por los manantiales del Suelo de Conservación (SC). En el caso de los sistemas que conforman el PAI, se tomó como referencia a CONAGUA (2021) donde se desglosan los caudales por ramal, lo que permitió conjuntar estos datos en PAI Norte y PAI Sur. Dado que algunos pozos pertenecientes al PAI Sur se localizan dentro de la CDMX, sus cifras se tomaron por separado, por la dificultad de su ubicación precisa.

Tabla 2 Caudales abastecidos a la Ciudad de México (2008-2018) desglosados según la ubicación de la fuente.

Ubicación de la fuente (alcaldía o sistema)	Caudal promedio aportado (m³/s)	Porcentaje con respecto del total (%)
Cutzamala	9.08	28.55
Lerma	3.94	12.40
Xochimilco	2.83	8.91
PAI Norte	2.45	7.71
Coyoacán	2.34	7.34
Tlalpan	2.12	6.68
Iztapalapa	1.82	5.71
Chiconautla	1.44	4.54
Azcapotzalco	0.96	3.03
Miguel Hidalgo	0.78	2.45
Benito Juárez	0.74	2.34
Manantiales (SC, CDMX)	0.74	2.31
Milpa Alta	0.66	2.08
PAI Sur	0.59	1.84
Álvaro Obregón	0.44	1.38
Iztacalco	0.27	0.84
Tláhuac	0.24	0.76
Cuauhtémoc	0.13	0.40
Venustiano Carranza	0.10	0.33
Magdalena Contreras	0.07	0.22
Cuajimalpa	0.03	0.11

Gustavo A. Madero	0.03	0.08
Total abastecido CDMX	31.81	100

Fuente: elaboración propia con base en SACMEX (2019c), (2019d), (2021c) y CONAGUA (2021).

A partir de los datos mostrados en la Tabla 2, destaca que la fuente con mayor aporte es el Sistema Cutzamala seguido del Sistema Lerma, que en conjunto representan un 40.95% del total. Por otro lado, el 42.65% proviene de los pozos ubicados en la CDMX, siendo los que se ubican en Xochimilco, Coyoacán, Tlalpan e Iztapalapa los contribuyen mayormente. Con respecto al resto de las fuentes, los sistemas PAI Norte y Chiconautla aportan 12.25% del total, quedando al final el PAI Sur y los manantiales ubicados en el SC. Es importante observar que los pozos ubicados en las cuatro alcaldías con mayor contribución a la extracción de agua subterránea (28.64%), suman una cantidad similar a la aportada por el Sistema Cutzamala (28.55%).

Este desglose de caudales por fuente sienta una base para evaluar de forma integral los costos e impactos desde una perspectiva local, que permite abordar la dinámica de la extracción, así como el contexto social, cultural y económico de cada sitio. Entre los planteamientos que expone la GIAU, aparece la comprensión del abastecimiento desde una mirada centrada en la demanda (Pinkham, 1999; Mitchell, 2006; Bahri, 2011). Para ello, es necesario abordar este componente de la gestión de una manera multifacética a partir del estudio de sus determinantes y de su distribución espacial (House-Peters y Chang, 2011), para que sea posible plantear acciones concretas en sitios precisos como parte del proceso de toma de decisiones (Baumann y Boland, 1997). Por esta razón, se utilizan los datos expuestos en el capítulo anterior para abordar la demanda urbana de agua estimada a nivel de alcaldía.

La Tabla 3 muestra el balance entre la extracción de agua subterránea y superficial con respecto a la demanda urbana de agua estimada que incluye los usos doméstico, mixto y no doméstico. También se incluye la intensidad de uso de agua, que se calculó en función del número total de usuarios que están registrados en cada una de las alcaldías de la CDMX. En este caso, el término usuario se refiere a la persona física o moral que contrata la prestación de los servicios hidráulicos del SACMEX; el uso doméstico se refiere al que cubre el suministro en las viviendas, el uso mixto corresponde a las tomas ubicadas en inmuebles con

uso habitacional y no habitacional de forma simultánea, en tanto que el uso no doméstico se destina a los establecimientos comerciales, industriales y de servicios (ALDF, 2003).

La estimación de la demanda urbana de agua se realizó tomando en cuenta el componente medido y el agua no contabilizada debido a los usuarios que carecen de medidor (Bell, 2018). La metodología para su cálculo se explica en el capítulo anterior, sin embargo es preciso mencionar que el balance expuesto en la Tabla 3 no contempla los caudales perdidos en fugas que se estiman en alrededor del 40% del abasto total (SACMEX, 2019a).

Tabla 3 Balance Extracción-Demanda e Intensidad del uso de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

Alcaldía	Extracción de agua subterránea y superficial (m ³ /s)	Demanda urbana de agua estimada (m ³ /s)	Balance Extracción-Demanda (m ³ /s)	Intensidad uso del agua (litros/usuario/día)
Xochimilco	2.83	0.42	2.41	552.60
Tlalpan	2.35	0.95	1.40	675.38
Coyoacán	2.34	1.19	1.15	639.89
Milpa Alta	0.66	0.08	0.58	482.49
Azcapotzalco	0.96	0.82	0.14	733.07
Cuajimalpa	0.25	0.38	-0.13	956.28
Tláhuac	0.24	0.38	-0.14	476.64
Magdalena Contreras	0.18	0.41	-0.23	956.56
Benito Juárez	0.74	0.98	-0.24	529.38
Iztapalapa	1.82	2.09	-0.27	486.58
Iztacalco	0.27	0.71	-0.45	695.92
Miguel Hidalgo	0.78	1.40	-0.62	1001.91
Venustiano Carranza	0.10	0.90	-0.79	725.89
Álvaro Obregón	0.62	1.54	-0.91	919.27
Cuauhtémoc	0.13	1.70	-1.57	775.55
Gustavo A. Madero	0.03	2.03	-2.00	758.69
CDMX	14.30	15.98	-1.68	710.38

Fuente: elaboración propia con base en SACMEX (2019c), (2019d), (2021c).

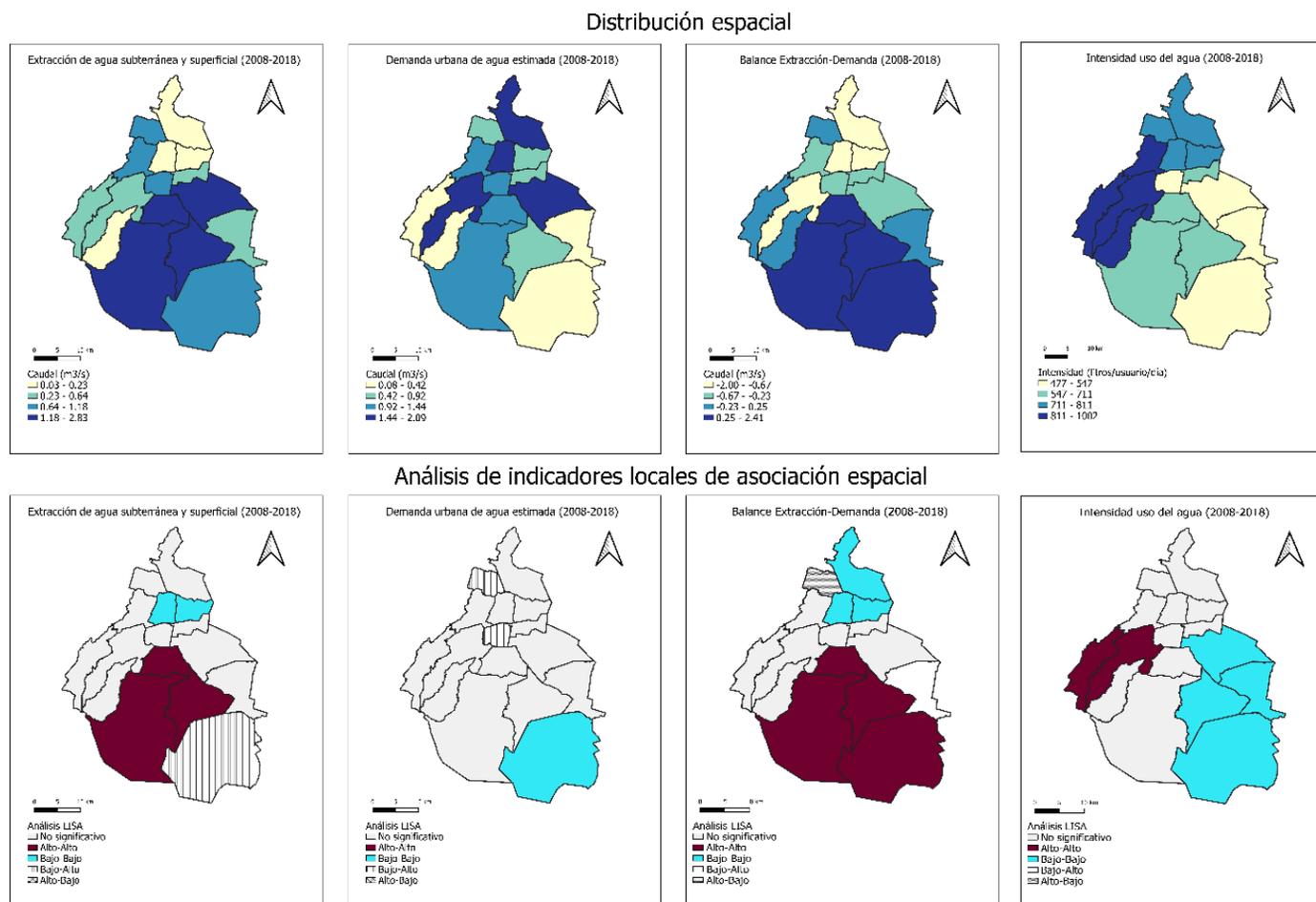
En la Tabla 3, se observa que cinco de las 16 alcaldías muestran un balance positivo, lo que indica que se utiliza menos agua de la que se extrae en sus territorios. En el caso de Xochimilco, Tlalpan, Coyoacán y Milpa Alta se ubican en el extremo sur de la ciudad, tres

de ellas pertenecen al SC donde tiene lugar la recarga de los acuíferos. En el lado opuesto, Gustavo A. Madero y Cuauhtémoc muestran el mayor desbalance, lo que indica que son las dos alcaldías que más dependen de la importación de agua. Por otra parte, las alcaldías de Miguel Hidalgo, Magdalena Contreras, Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Azcapotzalco y Venustiano Carranza tienen una intensidad de uso del agua por encima del promedio de la CDMX. Este dato es relevante para la gestión de la demanda de agua, ya que prácticamente todas estas alcaldías se encuentran en desbalance con respecto a la extracción de agua que se hace en sus territorios, por lo que resulta prioritario comprender la forma en que se utiliza el agua en estos sitios de la ciudad.

Parte de la comprensión local de los procesos de extracción y de demanda urbana de agua requiere del análisis espacial (House-Peters y Chang, 2011), por esta razón se realizó un Análisis de Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA) para ubicar los sitios en donde se agrupan los valores altos o bajos, a partir de la medición de la I de Moran. Este análisis permite detectar patrones espaciales que son significativamente estadísticos, con lo cual se determina que la distribución espacial no se debe al azar (Anselin, 2005; Buzai y Baxendale, 2012).

En la Figura 3 aparecen las distribuciones espaciales y los análisis LISA de la extracción de agua subterránea y superficial, de la demanda urbana de agua estimada, del balance extracción-demanda y de la intensidad de uso del agua en las alcaldías de la CDMX para el periodo 2008-2018. Los cálculos se realizaron con aleatorizaciones de 999 permutaciones y con matrices de *Queen* que contemplan la vecindad entre vértices y vecinos (Anselin, 2005; Buzai y Baxendale, 2012). El color rojo escarlata indica las alcaldías que conjuntan valores altos, mientras que el azul claro refiere a los grupos de valores bajos. La distribución espacial de la demanda urbana de agua estimada es la única que no presenta un patrón espacial significativo (I de Moran -0.04, valor de p 0.402), a diferencia de la intensidad de uso del agua. Ésta última, además de mostrar un patrón espacial significativo, cuenta el valor más alto para la I de Moran 0.54 (valor de p 0.001), seguida por la del balance entre la extracción y la demanda con 0.38 (valor de p 0.004), por último la extracción de agua subterránea y superficial tuvo un valor de 0.28 (valor de p 0.032).

Figura 3 Análisis de la extracción de agua subterránea y superficial, demanda urbana de agua, balance extracción-demanda e intensidad de uso de agua.



Véase Mapa de referencia en la Nota complementaria 2.

Los valores altos de la intensidad de uso de agua se conjuntan en un clúster conformado por las alcaldías de Cuajimalapa y Álvaro Obregón que contrasta con el conformado por Iztapalapa, Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta, donde se agrupan valores bajos. Respecto a la extracción subterránea y al balance extracción-demanda, las alcaldías de Coyoacán, Xochimilco y Tlalpan aparecen con valores altos espacialmente significativos para ambos rubros, por su parte Milpa Alta sólo cuenta con esta condición en el caso del balance. Estas alcaldías resaltan como una fuente muy importante para la ciudad, ya que proveen 25.01% del abasto total y su consumo no es local, como se aprecia con el balance positivo entre la extracción y la demanda. Esto sugiere que cierta cantidad del agua extraída de esta zona sirve para suministrar otros sitios de la ciudad. Por otro lado, debe mencionarse que este aporte es similar al 28.55% que provee el Sistema Cutzamala.

Además de la situación que guardan los caudales extraídos en comparación con la demanda que se genera en las alcaldías, se debe considerar la situación sociodemográfica que caracteriza a las áreas de consumo, como se muestra en la Tabla 4. Esta información se obtuvo con referencia a los clústeres espaciales resultantes del análisis LISA para el balance extracción-demanda; donde también aparecen tanto la intensidad de uso de agua, como la demanda, la extracción y el balance, junto con el tamaño del hogar (personas por vivienda) y la densidad de viviendas por hectárea, calculados a partir de los datos censales del 2020 (INEGI, 2021). Esta caracterización se retoma porque Wentz y Gober (2007) consideran que estas variables son un buen indicador de los usos interiores de agua. De manera similar, en Chang (2017) se menciona que la densidad urbana es un buen indicador de los usos exteriores, ya que, al reducirse las áreas de jardines y la presencia de albercas el consumo de agua tiende a disminuir. Estos determinantes han sido estudiados en ciudades de países desarrollados (Saurí, 2013), no obstante sirven como una aproximación para entender la demanda urbana de agua de una forma global.

Por su parte, en la Tabla 5 se recabaron datos del censo económico de 2019 para mostrar el total de personal ocupado por unidad económica, así como el total de unidades económicas registradas por hectárea (INEGI, 2020). Esta caracterización se realizó porque la demanda y la intensidad también incluyen a los usos mixto y no doméstico. Se tomaron en cuenta tanto el número de personas ocupadas por unidad económica, así como las unidades

económicas por hectárea para caracterizar los usos interiores y exteriores que corresponden al uso mixto y no doméstico de agua. Estos cálculos presentan un panorama general para las alcaldías.

Tabla 4 Características de las viviendas en los clústeres espaciales del Balance Extracción-Demanda de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

Clúster espacial	Balance Extracción-Demanda (m³/s)	Intensidad uso del agua (litros /usuario /día)	Demanda urbana de agua estimada (m³/s)	Extracción de agua subterránea y superficial (m³/s)	Tamaño del hogar (habitantes /vivienda)	Densidad de viviendas (vivienda/ha)
No significativo	-2.86	792.27	7.51	4.66	3.29	37.55
Alto-Alto	5.54	587.59	2.63	8.18	3.59	20.48
Bajo-Bajo	-4.37	753.37	4.63	0.26	3.16	43.54
Bajo-Alto	-0.14	476.64	0.38	0.24	3.67	24.69
Alto-Bajo	0.14	733.07	0.82	0.96	3.22	37.54
CDMX	-1.68	710.38	15.98	14.30	3.36	33.60

Fuente: elaboración propia con datos provenientes de INEGI (2021) y SACMEX (2019c), (2019d), (2021c).

Tabla 5 Características de las unidades económicas en los clústeres espaciales del Balance Extracción-Demanda de agua en las alcaldías de la Ciudad de México (2008-2018).

Clúster espacial	Balance Extracción-Demanda (m³/s)	Intensidad uso del agua (litros /usuario /día)	Demanda urbana de agua estimada (m³/s)	Extracción de agua subterránea y superficial (m³/s)	Personal ocupado (persona/ unidad económica)	Densidad de unidades económicas (unidad/ha)
No significativo	-2.86	792.27	7.51	4.66	14.25	5.05
Alto-Alto	5.54	587.59	2.63	8.18	5.45	2.82
Bajo-Bajo	-4.37	753.37	4.63	0.26	7.90	10.43
Bajo-Alto	-0.14	476.64	0.38	0.24	2.75	3.90
Alto-Bajo	0.14	733.07	0.82	0.96	22.07	4.83
CDMX	-1.68	710.38	15.98	14.30	10.63	5.41

Fuente: elaboración propia con datos provenientes de INEGI (2020) y SACMEX (2019c), (2019d), (2021c).

Las viviendas y las unidades económicas ubicadas en los clústeres Alto-Alto y Bajo-Bajo del Balance Extracción-Demanda que aparecen en la Figura 3, con colores rojo escarlata y azul claro, respectivamente, exhiben características disímiles entre sí. Con ello resalta que

las áreas con balance positivo son distintas de las que presentan balance negativo. El clúster de alcaldías que resultó no significativo es el que muestra mayor intensidad de uso de agua, pese a que la densidad de viviendas y de unidades económicas está por encima del promedio de la ciudad. Este mismo clúster también se caracteriza por contar con un tamaño del hogar bajo y una alta cantidad de personas empleadas por unidad, esto sugiere hacer énfasis en los usos interiores que se le da al agua por encima de los exteriores. Por otra parte, gran cantidad de la población y de las actividades económicas de la ciudad se asienta en las alcaldías que se encuentran en desbalance con respecto a la extracción de agua que se realiza en sus territorios, lo que sugiere que son altamente dependientes de caudales importados. Por esta razón, en la siguiente sección se analiza esta información con respecto de los sistemas externos que abastecen las diferentes zonas de la CDMX.

Situación de la demanda urbana de agua con respecto a los sistemas de abastecimiento externos

Como se apuntó en el apartado anterior, el desglose local de abasto de agua hacia la Ciudad de México es complejo dada la ubicación de las fuentes en diferentes entidades federativas y cuencas, además de los tipos de aprovechamiento de que se trata. Ante esto, se utilizaron los datos del *Anuario Estadístico del Distrito Federal 2011* referenciado como INEGI (2011), además de CONAGUA (2013) para saber cuáles son las alcaldías que reciben agua tanto de los sistemas Lerma y Cutzamala, así como de las baterías de pozos que conforman los ramales del PAI. Estas dos fuentes de información permitieron vislumbrar las diferentes combinaciones de sistemas que abastecen a cada una de las alcaldías, con lo que se conformó la Figura 4. Esta zonificación se nombró como áreas continuas de abasto externo, que posteriormente se utilizaron como unidades espaciales de análisis.

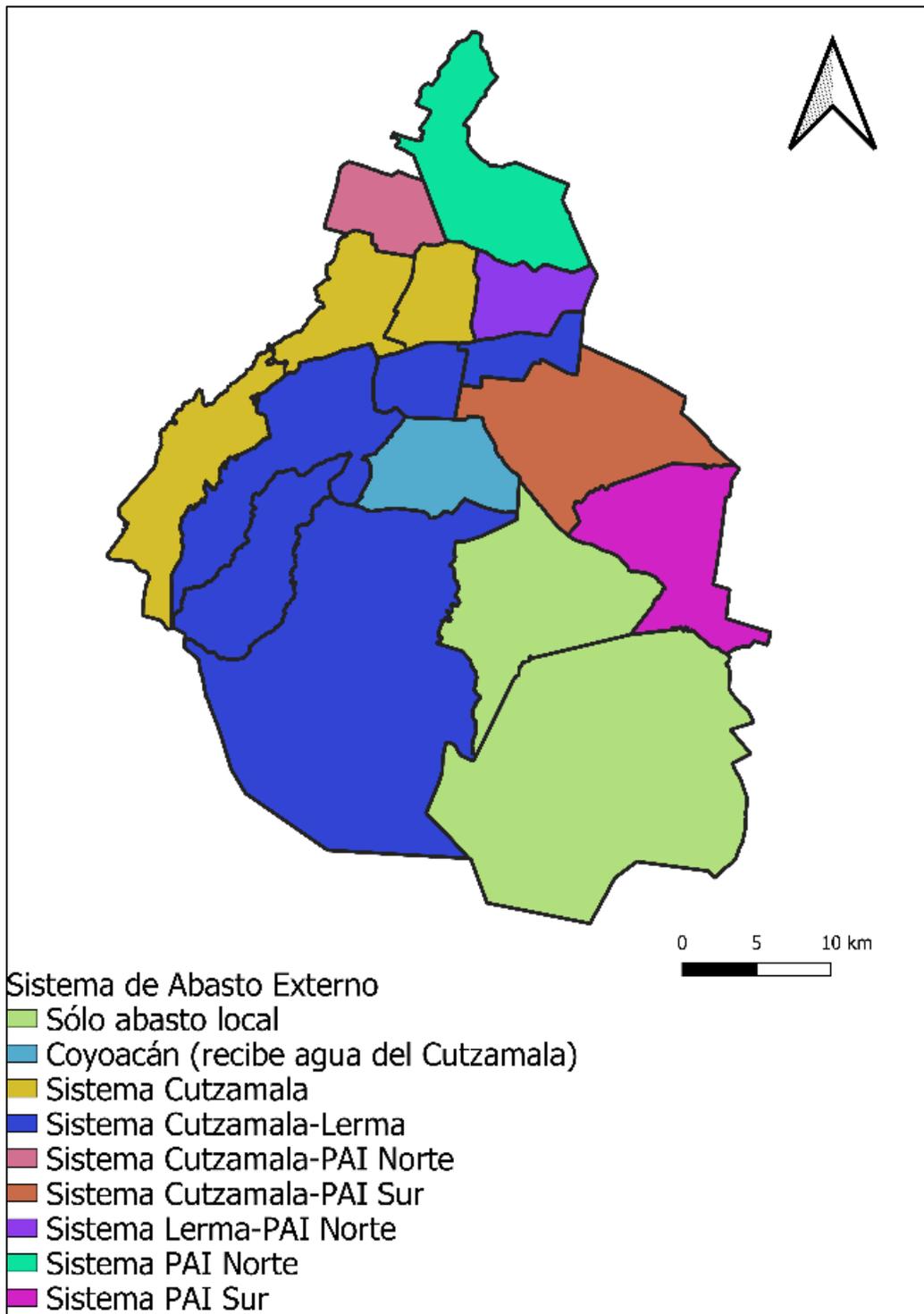
Algunas alcaldías reciben agua de varios sistemas externos, por ello se hizo la clasificación según estas combinaciones y se agruparon las que limitan entre sí. En el caso de Coyoacán, se dejó por aparte porque no limita con ninguna alcaldía que reciba únicamente agua del Sistema Cutzamala como fuente externa. Por su parte, Milpa Alta y Xochimilco no reciben caudales importados, por ello se nombraron como “Sólo abasto local” haciendo referencia a la extracción de agua subterránea que se hace en sus territorios. La distinción

entre el PAI Norte y el PAI Sur se realizó con respecto a la ubicación de los ramales según CONAGUA (2013:150). El análisis de la información se realizó tomando en cuenta estas áreas continuas de abasto externo, para relacionar el consumo local con la visión desde las cuencas que componen el sistema regional.

En la Figura 5 se muestran las distribuciones espaciales de la extracción de agua subterránea y superficial, la demanda urbana de agua estimada, el balance extracción-demanda y la intensidad de uso del agua según las áreas continuas de abasto externo. También aparecen los resultados de los análisis LISA para estas distribuciones espaciales; en esta ocasión solamente la intensidad de uso del agua obtuvo un valor significativo de 0.60 para la I de Moran (valor de p 0.001). Las alcaldías de Cuajimalpa, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Azcapotzalco, Gustavo A. Madero y Venustiano Carranza son las que muestran un patrón espacial significativo para la intensidad de uso de agua; estas alcaldías son abastecidas por el Sistema Cutzamala y por el PAI Norte, y a su vez tienen un balance negativo. En contraste Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta muestran baja demanda e intensidad de uso de agua con un balance positivo.

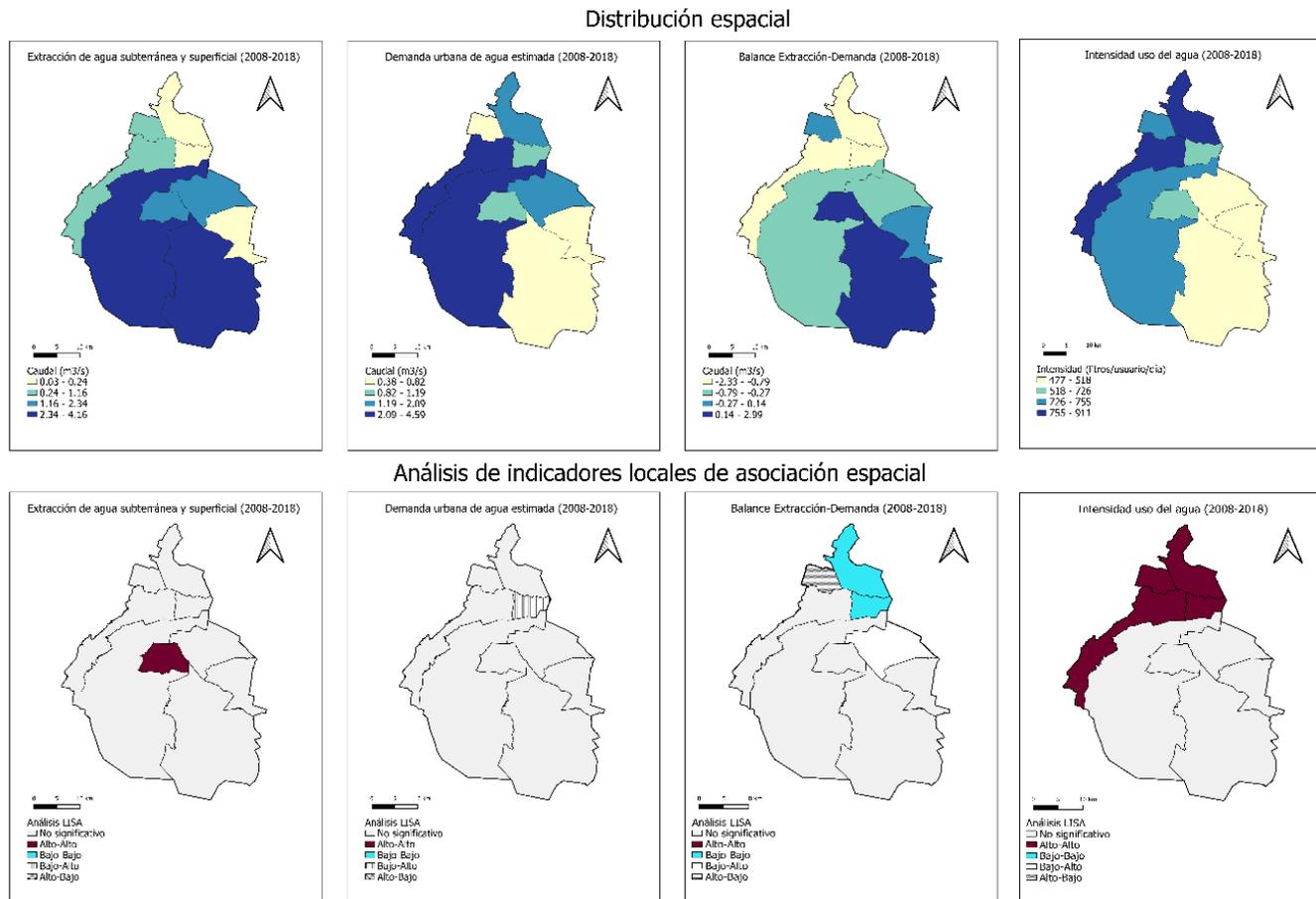
En la Tabla 6 se abordan algunas características de las viviendas y de las unidades económicas de la CDMX según la intensidad de uso del agua, en las áreas continuas de abasto externo. Las alcaldías que conforman las áreas abastecidas por el Sistema Cutzamala, PAI Norte y Lerma son las que tienen una intensidad de uso del agua por encima del promedio de la ciudad. En general, estas zonas se caracterizan por tamaño del hogar bajo y alta densidad de vivienda (excepto en el caso del área abastecida únicamente por el PAI Norte), así como por alto número de personal ocupado y alta cantidad de unidades económicas por hectárea. Estas características señalan a estas áreas como prioritarias para la ejecución de acciones de gestión de la demanda de agua, orientadas principalmente a reducir la intensidad de uso del agua. Este punto se señala debido a la alta dependencia que tienen estas alcaldías en los recursos hídricos externos.

Figura 4 Áreas continuas de abasto externo en función de los sistemas externos que abastecen a las alcaldías de la Ciudad de México.



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2011) y CONAGUA (2013).

Figura 5 Distribución espacial de la extracción, demanda urbana de agua, balance extracción-demanda e intensidad de uso del agua según las áreas continuas de los sistemas externos (2008-2018).



Véase Mapa de referencia en la Nota complementaria 2.

Tabla 6 Características sociodemográficas con respecto de la intensidad de uso del agua en las áreas continuas de abasto externo a la CDMX (2008-2018).

Área continua por sistema externo	Intensidad uso del agua (litros /usuario /día)	Tamaño del hogar (habitantes/vivienda)	Densidad de viviendas (vivienda/ha)	Personal ocupado (persona/unidad económica)	Densidad de unidades económicas (unidad/ha)
Cutzamala	911.24	3.06	34.47	21.30	8.32
PAI Norte	758.69	3.45	36.30	4.21	5.13
Cutzamala-Lerma	755.30	3.29	38.74	10.79	4.85
Cutzamala-PAI Norte	733.07	3.22	37.54	22.07	4.83
Lerma-PAI Norte	725.89	3.27	37.62	5.44	8.12
Coyoacán (recibe agua del Sistema Cutzamala)	639.89	3.21	33.36	8.02	3.97
Abasto Local	517.54	3.84	14.58	2.55	2.47
Cutzamala-PAI Sur	486.58	3.64	41.87	4.59	6.52
PAI Sur	476.64	3.67	24.69	2.75	3.90
CDMX	710.38	3.36	33.60	10.63	5.41

Fuente: elaboración propia con datos provenientes de INEGI (2020), (2021).

A partir del efecto que se atribuye a la densidad urbana en términos de la reducción del consumo de agua, se debe comprender el tipo de viviendas en cuestión (Chang, 2017). En general, las viviendas unifamiliares suburbanas son las que han mostrado mayor tendencia hacia los usos exteriores de agua en comparación con los conjuntos multifamiliares (Wentz y Gober, 2007; Saurí, 2013). Para aproximar estos efectos, se contabilizó el número de viviendas según su clase de acuerdo con los datos y definiciones de INEGI (2021). Se conjuntaron los rubros de casa única en el terreno, casa que comparte terreno con otras y casa dúplex como casa independiente, con la finalidad de caracterizar las viviendas unifamiliares. Con respecto al resto de las clases que aparecen en INEGI (2021), se contemplaron las viviendas en departamento, viviendas en vecindades o cuartería, viviendas colectivas (asilos, albergues, cárceles, hospitales, etcétera) y el resto (local no construido para habitación, vivienda móvil y refugio) se añadieron como la categoría de otro.

En la Tabla 7 aparece esta caracterización de las viviendas según el clúster de alta intensidad de uso del agua (en color rojo escarlata en la Figura 5). Además de los tipos de vivienda, se muestran los datos del balance entre la extracción y la demanda, junto con el

total de la población. Adicionalmente, se agregó el número de días promedio al bimestre en que se realiza suministro continuo para abordar la heterogenidad del acceso al agua (Jiménez *et al.*, 2011).

A partir de los datos expuestos en la Tabla 7 (en la siguiente página), el clúster espacial de alta intensidad muestra un balance negativo entre la demanda urbana de agua y la extracción de agua subterránea y superficial. Además, en este clúster hay una menor cantidad de casas independientes lo que sugiere alta intensidad en los usos externos de agua, mientras que el resto de clases de vivienda son similares en ambos clústeres. Por otra parte, el 35.02% de la población de la ciudad se localiza dentro de este clúster de alta intensidad, que también se caracteriza por mostrar un promedio bimestral de suministro continuo de agua más alto, en comparación con el resto. Este resultado puede deberse a la cercanía de los caudales que ingresan por el lado poniente, de la mano con altos usos exteriores en algunas partes de esta zona, además de la infraestructura para su aprovechamiento.

Dado que el cálculo de intensidad de uso de agua también incluye a los usos mixto y no doméstico, en la Tabla 8 (en la siguiente página) se muestra el total de personal ocupado, así como las unidades económicas totales según el rango de personas empleadas en los establecimientos, de acuerdo con los datos del censo económico de 2019 referenciados como INEGI (2020). De manera similar a la Tabla 7, aparece el número de días de suministro bimestral promedio. Este análisis pretende caracterizar el tipo de uso del agua que se hace desde las unidades económicas asentadas en la ciudad, además de aproximar el efecto de la población flotante que se desplaza hacia la CDMX de forma cotidiana para realizar actividades laborales.

El clúster de alta intensidad de uso de agua agrupa el 57.37% del personal ocupado que labora en la ciudad. De igual forma, las unidades económicas que se asientan en este clúster representan a un 44% del total de la ciudad; de este porcentaje el 91% corresponde al estrato de entre 0 y 10 personas empleadas, mientras que el resto se distribuye en los demás estratos. Este resultado sugiere la importancia de los establecimientos pequeños. Por otro lado, el 55% de los establecimientos con 51 personas empleadas en adelante, se localizan en este mismo clúster, lo que se relaciona con los grandes usuarios.

Tabla 7 Clases de vivienda con respecto a los clústeres espaciales de intensidad de uso de agua, balance extracción-demanda y suministro en la Ciudad de México (2008-2018).

Clúster espacial	Intensidad (litros /usuario /día)	Balance (m ³ /s)	Población	Casas Independientes	Viviendas en departamento	Viviendas en vecindad	Viviendas colectivas	Otro	Suministro continuo bimestral (promedio de días)
No significativo	575.19	3.31	5,982,231	1,289,896	417,801	27,195	712	7,672	31.91
Alto-Alto	782.22	-4.98	3,224,075	560,165	414,024	31,535	402	8,031	56.95
CDMX	667.20	-1.68	9,206,306	1,850,061	831,825	58,730	1,114	15,703	43.04

Fuente: elaboración propia con datos provenientes de INEGI (2021) y SACMEX (2019b), (2019d), (2021c).

Tabla 8 Tamaño de establecimientos de las unidades económicas, con respecto a los clústeres espaciales de intensidad de uso de agua, balance extracción-demanda y suministro en la Ciudad de México (2008-2018).

Clúster espacial	Intensidad (litros /usuario /día)	Balance (m ³ /s)	Personal ocupado total	Tamaño de establecimiento (unidades económicas)				Suministro continuo bimestral (promedio de días)
				Estrato de 0 a 10 personas	Estrato de 11 a 50 personas	Estrato de 51 a 250 personas	Estrato de 251 y más personas	
No significativo	575.19	3.31	1,831,923	224,417	11,480	2,961	805	31.91
Alto-Alto	782.22	-4.98	2,465,211	171,623	12,142	3,480	1,051	56.95
CDMX	667.20	-1.68	4,297,134	396,040	23,622	6,441	1,856	43.04

Fuente: elaboración propia con datos provenientes de INEGI (2020) y SACMEX (2019b), (2019d), (2021c).

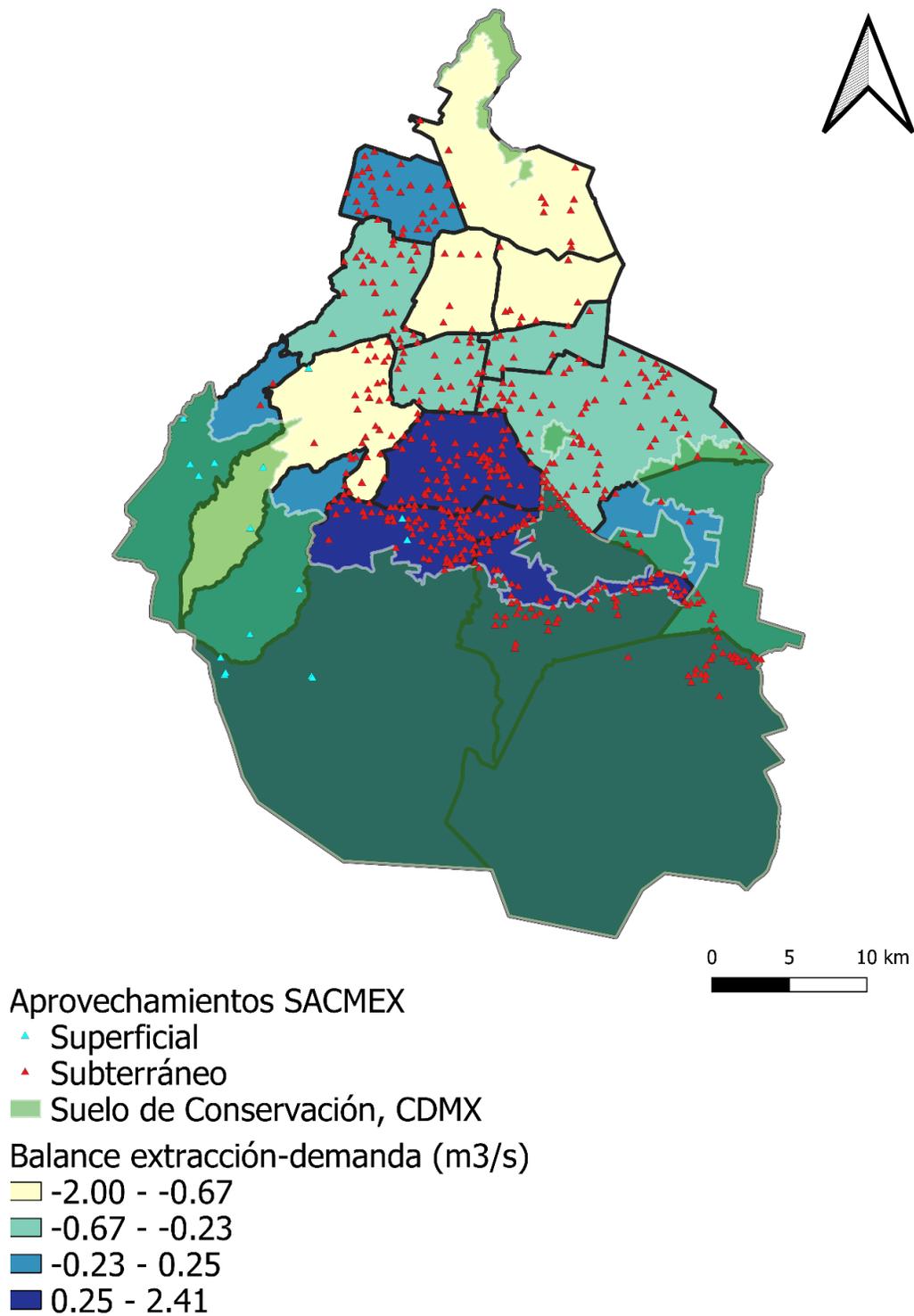
En conjunto, las alcaldías que reciben agua de los Sistemas Cutzamala, PAI Norte y Lerma son las que generan una intensidad de uso del agua por encima del promedio de la ciudad, además de ser la zona que cuenta con mayor cantidad de personal ocupado, aunque no de población residente. Con respecto a los usos del agua, las casas independientes y en general los establecimientos ubicados en esta zona, destacan como prioridad para las medidas de fomento para la gestión de la demanda de agua. En contraste, la zona sur de donde se extrae mayor cantidad de agua subterránea y superficial se caracteriza por una menor demanda e intensidad de uso del agua. Esto lleva a tomar en cuenta el papel que juega el Suelo de Conservación de la CDMX, porque en esta zona se recargan los acuíferos que proveen más del 40% del agua del abasto de la ciudad.

Aporte del Suelo de Conservación y uso local del agua al interior de la Ciudad de México

Desde el año 2000 se decretó el Suelo de Conservación en gran parte de la zona sur de la Ciudad de México, englobando 87,297 hectáreas que representan el 59% de la extensión territorial de esta entidad federativa. A través de esta figura legal se busca contener el crecimiento de la zona urbana, así como vedar las actividades extractivas y preservar la vocación rural del área (SEDEMA 2016). Se reconoce que esta zona es importante para la recarga de los acuíferos, de donde se obtiene un porcentaje importante del agua que se utiliza en la zona urbana y que se extrae a través de los sistemas de pozos (Escolero *et al.*, 2016). En el Figura 6 se muestra la ubicación del Suelo de Conservación con respecto del balance de extracción-demanda, así como de los aprovechamientos subterráneos y superficiales que tiene asignados el SACMEX (CONAGUA, 2018).

Para efectos de este análisis, se excluyeron las alcaldías de Gustavo A. Madero e Iztapalapa que conforman el 2.4% de la superficie del SC (SEDEMA 2016) y cuya dinámica es meramente urbana. Por su parte, en el Suelo de Conservación se ubican 42 núcleos agrarios reconocidos en el Registro Agrario Nacional, 36 de ellos se asientan en la zona sur, en las alcaldías de Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan, Milpa Alta, Xochimilco y Tláhuac. Estos núcleos agrarios son tanto comunidades como ejidos (RAN, 2017).

Figura 6 Ubicación del Suelo de Conservación de la CDMX en comparación del balance extracción-recarga y de los aprovechamientos asignados al SACMEX.



Resulta importante mencionar, como se observa en la Figura 6, que el 53% de los pozos que abastecen a la ciudad se ubican en las alcaldías donde el balance entre la extracción y la demanda es positivo. Al mismo tiempo, estos pozos se localizan al margen del Suelo de Conservación, haciendo importante considerar el tipo de flujos subterráneos que se aprovechan en la parte baja (Martínez, *et al.* 2015; Escolero, *et al.* 2016). En este sentido, comprender el papel que juegan los núcleos agrarios en la preservación de las condiciones del SC tiene efecto en la provisión del agua que se aprovecha en toda la CDMX.

En la Tabla 9 se expone la extracción subterránea y superficial, junto con la demanda urbana de agua estimada, el balance extracción-demanda y los días promedio de suministro continuo al bimestre para las alcaldías que conforman el SC y el suelo urbano.

Tabla 9 Balance extracción-demanda y promedio de días de suministro continuo según tipo de suelo en la Ciudad de México (2008-2018).

Tipo de suelo	Extracción de agua subterránea y superficial (m³/s)	Demanda urbana de agua estimada (m³/s)	Balance Extracción-Demanda (m³/s)	Suministro continuo (días en promedio)
Suelo de Conservación	7.14	4.16	2.98	28.75
Suelo Urbano	7.16	11.82	-4.65	53.08
CDMX	14.30	15.98	-1.68	42.44

Fuente: elaboración propia con datos provenientes de SACMEX (2019b), (2019d), (2021c).

Se observa que el aporte del suelo urbano en términos de la extracción es un poco mayor que el del SC, lo que implica un 22.51% del total abastecido a la CDMX contra un 22.45%, respectivamente. Por el contrario, la demanda urbana de agua estimada es tres veces mayor en las alcaldías de suelo urbano en comparación con las que conforman el SC, además de la condición de suministro intermitente en ambas áreas. Se puede apreciar, en estos términos, que las alcaldías en donde se extiende el SC tuvieron en promedio menos días de suministro continuo durante el periodo 2008-2018 en comparación con el suelo urbano. Esta situación, destaca la diferencia entre las áreas de provisión y las áreas de consumo, que enmarcan tanto al SC como al suelo urbano.

Se debe señalar que el aporte de agua que se extrae en el suelo urbano depende de las condiciones en las que se encuentra el SC, al tratarse de un sistema de flujos subterráneos; por ello esta zona de la ciudad tiene un rol doblemente importante tanto en la provisión como en el mantenimiento de un pilar tan relevante como lo es el 45% de abastecimiento total de agua que requiere la CDMX, como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10 Extracción de agua subterránea y superficial por fuente de abastecimiento de agua para la Ciudad de México (2008-2018).

Fuente	Caudal promedio aportado (m³/s)	Porcentaje con respecto del total (%)
Cutzamala	9.08	28.55
Extracción en las alcaldías del Suelo Urbano (CDMX)	7.16	22.52
Extracción en las alcaldías del Suelo de Conservación (CDMX)	7.14	22.45
Lerma	3.94	12.39
PAI Norte	2.45	7.70
Chiconautla	1.44	4.53
PAI Sur	0.59	1.86
Total	31.81	100

Fuente: elaboración propia con base en SACMEX (2019c), (2019d), (2021c) y CONAGUA (2021).

Dada la dependencia que tiene la ciudad en la zona sur, la comprensión del abastecimiento de agua desde los servicios ecosistémicos tanto de provisión como de soporte, resultan un instrumento para fortalecer la gestión del agua, que debe orientarse hacia una visión de largo plazo. Parte de abrodar el rol del SC se relaciona con comprender el rol que tienen las comunidades y los ejidos que se asientan en esta zona, dado que son un factor fundamental en la conservación de la fuente de agua más importante para la ciudad. En el sentido de integración, también es pertinente evaluar la cantidad de agua que se recarga y el movimiento subterráneo que presenta para comprender a mayor profundidad la dinámica del sistema natural.

Comentarios Finales

El análisis espacial de la extracción de agua subterránea y superficial, la demanda urbana de agua estimada, el balance extracción-demanda y la intensidad uso del agua, en las alcaldías de la CDMX, permite distinguir entre las zonas de consumo y las de provisión. Si bien destaca que la demanda promedio anual no muestra un patrón espacial específico, es importante mencionar que la intensidad de uso del agua y el balance extracción-demanda sí tienen esta condición. La intensidad de uso de agua es el factor más importante para atender, principalmente en las alcaldías de Miguel Hidalgo, Cuajimalpa, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Azcapotzalco y Venustiano Carranza, que dependen de los recursos hídricos externos provenientes del Sistema Cutzamala, Lerma y del PAI Norte. Esta zona también se caracteriza por albergar pocas viviendas en casas independientes y establecimientos grandes que emplean de 51 personas a más de 251.

Los indicadores de tamaño del hogar y de densidad urbana no resultan completamente útiles para comprender la eficiencia del uso del agua, ya que, en el caso de la Ciudad de México, las altas intensidades de uso del agua se relacionan con sitios que muestran alta densidad y también bajo tamaño del hogar. En este punto, se debe considerar tanto la localización de las fuentes externas como la condición de la infraestructura que permite acceder al recurso, haciendo notar que una alta disponibilidad del recurso no implica forzosamente mejor calidad de acceso al servicio de suministro. Este punto destaca dos zonas con retos diferentes en términos de la gestión del agua.

Entre las fuentes de abastecimiento de la ciudad está el Sistema Chiconautla, compuesto por pozos que opera el SACMEX. Sin embargo, en las fuentes de información que se revisaron no aparecen las alcaldías hacia donde llegan estos caudales. Por su ubicación y dada la demanda que genera la alcaldía de Gustavo A. Madero, es posible que esta fuente cubra sus requerimientos; lo que haría que el clúster de alta intensidad de agua dependiera tanto del Sistema Cutzamala, Lerma, PAI Norte y también del Sistema Chiconautla. Pese a la utilidad de la información aportada por INEGI (2011) y por CONAGUA (2013), es importante mencionar que la forma idónea para conocer el rol que juegan las fuentes externas, en términos de la demanda y de la intensidad de uso del agua, radica en conocer los caudales que aporta cada una, así como la temporalidad en que lo hacen.

Pese a la falta de información en este aspecto, los resultados obtenidos señalan que la intensidad de agua en relación con los aportes externos del sistema regional de abasto, muestran un patrón espacial que brinda información relevante para la gestión.

Además de destacar el doble rol que juega el SC en el sur de la CDMX para garantizar el 45% del total de abasto de la ciudad, debe tomarse en cuenta el estado en que se encuentran los ramales del PAI Norte y del Sistema Chiconautla, ya que abastecen el 12.23% del agua que se utiliza en la ciudad y que cubre las necesidades de las zonas que generan demanda con mayor intensidad. Por otra parte, debe tomarse en cuenta el papel de abastecimiento que tienen los pozos del PAI hacia los municipios conurbados de la Zona Metropolitana del Valle de México y del estado de Hidalgo, por lo que, es necesario estudiar el funcionamiento de los sistemas de flujo subterráneo y también los posibles mecanismos para su conservación.

Como resultado de la explotación de los patrones espaciales, se identificó que la distribución de los recursos hídricos dentro de la ciudad es diferenciada, por lo que es necesario plantear diferentes tipos de acciones para optimizarla, de tal forma que la reducción de la intensidad del uso de agua en las alcaldías de Miguel Hidalgo, Cuajimalpa, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Azcapotzalco y Venustiano Carranza beneficie al resto de la ciudad, y que a su vez se refleje en una disminución de la presión que se ejerce sobre las fuentes de abastecimiento. En este mismo sentido, se debe realizar un análisis en escalas más finas que permitan detectar las colonias prioritarias para reducir la intensidad de uso del agua. Por otra parte, la detección y supresión de fugas puede ser un camino para optimizar la distribución del agua.

En el tránsito hacia una comprensión integral, tanto en la visión de cuenca como desde la demanda, en el caso de la Ciudad de México resulta importante distinguir los aportes de agua desde las alcaldías que conforman el Suelo de Conservación. También, es importante mencionar que los aportes externos tienen un componente espacial y que su distribución no es homogénea al interior de la ciudad. Con respecto a la gestión de la demanda, el tema prioritario para atender es la reducción de intensidad de uso del agua más allá de solamente plantear la dinámica poblacional en relación con el consumo. Adicionalmente, se debe diagnosticar la condición que guarda la infraestructura para suministro, que puede hacer la diferencia de acceso al agua en distintos sitios de la ciudad. Ante los retos que se presentan

en la gestión del agua, la visión espacial de los componentes que se expuso en el presente capítulo permite vincular una visión local con la del sistema regional de abasto.

Referencias

- ALDF [Asamblea Legislativa del Distrito Federal]. (2003). *Ley de Aguas del Distrito Federal*. México, DF: Gobierno del Distrito Federal.
- Anselin, L. (2005). *Exploring Spatial Data with GeoDa: A Workbook*. Santa Barbara: Center for Spatially Integrated Social Science.
- Bahri, A. (2011). *Gestión integrada de aguas urbanas*. Estocolomo: Global Water Partnership.
- Baumann, D., y Boland, J. (1997). The Case for Managing Urban Water. In D. Baumann, J. Boland, y W. Hanemann, *Urban Water Demand Management and Planning* (pp. 1-30). Nueva York: Mc Graw Hill.
- Bell, S. (2018). *Urban Water Sustainability. Constructing infrastructure for cities and nature*. Nueva York: Routledge.
- Billings, R., y Jones, C. (2008). *Forecasting Urban Water Demand* (2 ed.). Denver: American Water Works Association.
- Buzai, G., y Baxendale, C. (2012). *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Ordenamiento territorial. Temáticas de base vectorial*. Buenos Aires: Lugar.
- Chang, H. (2017). Water Conservation. In D. Richardson (Ed.), *The international encyclopedia of geography : people, the earth, environment, and technology* (pp. 7623-7628). Chichester, West Sussex: Wiley Blackwell.
- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2009). *Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento*. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2013). *Estadísticas del Agua, Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Edición 2013*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (31 de Diciembre de 2018). *Consulta a la base de datos del REPDA*. Recuperado el 04 de Abril de 2019, de <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>.
- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2021). *Solicitud de información pública 1610100001721 sobre caudales que conforman el PAI*. Obtenido de Plataforma Nacional de Transparencia: <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>.
- Escolero, O., Kraslisch, S., Martínez, S., y 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.
- GDF [Gobierno del Distrito Federal]. (2010, May 13). 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: Secretaría del Medio Ambiente, Sistemas de Agua de la Ciudad de México.
- GWP [Asociación Mundial para el Agua]. (2000). *Integrated Water Resources Management*. Estocolmo, Suecia: Global Water Partnership.
- House-Peters, L., y Chang, H. (2011). Urban water demand modeling: Review of concepts, method and organizing principales. *Urban Water Research*, 47(15).
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. (2011). *Anuario estadístico del Distrito Federal. Edición 2011*. Aguascalientes, Ags.: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. (16 de 07 de 2020). *Censos Económicos 2019*. Obtenido de Datos abiertos: https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Datos_abiertos.
- INEGI [Instituto Nacional de Estadística y Geografía]. (16 de 03 de 2021). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Obtenido de Datos abiertos: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Datos_abiertos.
- Jiménez, B., Gutiérrez, R., Marañón, B., y González, A. (2011). *Evaluación de la política de acceso al agua potable en el Distrito Federal*. México: Evalúa DF-PUEC-UNAM.
- Kayaga, S., y Smout, I. (2011). *Water Demand Management in the City of the Future*. Leicestershire: WEDC, Loughborough University.
- Martínez, S., Escolero, O., y 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.
- Mitchell, G. (2006). Applying Integrated Urban Water Management Concepts: A Review of Australian Experience. *Environmental Management*, 37(5), 589-605. doi: <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0252-1>.
- Perló, M., y González, A. (2009). *¿Guerra por el agua en el Valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Fderal y el Estado de México* (2a ed.). México: PUEC-UNAM.
- Pinkham, R. (1999). *21st Century Water Systems: Scenarios, Visions, and Drivers*. Retrieved 12 15, 2016, from http://www.rmi.org/Knowledge-Center/Library/W99-21_21stCenturyWater.
- Ramos-Bueno, A., Perevochtchikova, M., y Chang, H. (2021). Socio-spatial analysis of residential water demand in Mexico City. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(2), 59-110. doi: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-02>.
- RAN [Registro Agrario Nacional]. (05 de Julio de 2017). *Catálogo de Núcleos Agrarios*. Recuperado el 10 de Agosto de 2017, de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/catalogo-de-nucleos-agrarios>.

- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2019a). *Librería Virtual. Diagnósticos, logros y desafíos SACMEX 2018*. Recuperado el 12 de 05 de 2019, de <http://data.sacmex.cdmx.gob.mx/aplicaciones/libreria/biblioteca/libros/2018/diagnostico-logros-y-desafios-2018.pdf>.
- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2019b). *Portal de transparencia. Solicitud de información pública 0324000163219, sobre horarios y días de tandeo a las colonias de la CDMX*. Obtenido de Sistema de Solicitudes de Información, INFOMEX CDMX: <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>.
- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2019c). *Portal de transparencia. Solicitud de información pública 0324000119619, sobre caudales históricos de fuentes externas (2005-2018)*. Obtenido de Sistemas de Solicitudes de Información, INFOMEX CDMX: <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>.
- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2019d). *Portal de transparencia. Solicitud de información pública 0324000004819, sobre medición de caudales y calidad de los manantiales de la CDMX (1987-2018)*. Obtenido de Sistemas de Solicitudes de Información, INFOMEX CDMX: <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>.
- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2021c). *Portal de transparencia. Solicitud de información pública 0324000032121 sobre extracción de agua subterránea*. Obtenido de Sistema de Solicitudes de Información, INFOMEX CDMX: <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>.
- Saurí, D. (2013). Water Conservation: Theory and Evidence in Urban Areas of the Developed World. *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 227-248. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-013113-142651>.
- SEDEMA [Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México]. (22 de Marzo de 2016). *Cuidar el Aguas es Cosa de Tod@s*. Recuperado el 04 de Abril de 2019, de Suelo de

conservación: nuestra principal fuente local de agua en la CDMX:
http://www.cuidarelagua.cdmx.gob.mx/fuentes_agua.html.

Tiburcio, A., y Perevochtchikova, M. (2012). Indicadores ambientales en la gestión del agua urbana. In M. Perevochtchikova, *Cultura del agua en México. Conceptualización y vulnerabilidad social*. México, DF: UNAM-Porrúa.

Wentz, E., y Gober, P. (2007). Determinants of Small-Area Water Consumption for the City of Phoenix, Arizona. *Water Resources Management*, 21, 1849-1863.

Conclusiones generales

En la presente sección se responden las preguntas de investigación que se plantearon en el apartado de Introducción. Para dar respuesta a cada una, se hace alusión a diferentes partes del texto en las que se desarrollaron los puntos particulares que conforman el diagnóstico de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México, definida desde la visión del quehacer de los organismos operadores y tomando como punto clave su análisis espacial, partiendo desde una visión multifacética que comprende diferentes tipos de determinantes, dentro del marco que abarca la Gestión Integrada del Agua Urbana.

¿Qué determinantes demográficos, sociales, económicos y de densidad urbana explican la demanda de agua en la Ciudad de México?

El abordaje multifacético de la demanda de agua en la Ciudad de México mostró que los determinantes útiles para explicar su componente medido dependen del tipo de uso de agua en cuestión. En general, la tipología de domicilios clasificada por el INEGI, así como las variables de acceso al agua, temporalidad, estacionalidad, micromedición y los reportes de fugas sirven para abordar los usos doméstico, mixto y no doméstico en diferente medida; aunque en el caso de este último uso, las variables estudiadas presentaron algunas limitaciones. Estos resultados tienen buen ajuste con información generada a nivel de colonia y de alcaldía, en forma anual y bimestral.

Los coeficientes beta (β) para la micromedición fueron los que más contribuyeron para explicar cada uno de los usos del agua, lo que también permitió calcular los caudales de agua no contabilizada en la ciudad. La importancia del análisis que relacionó el componente medido de la demanda urbana de agua con el ambiente urbano construido, caracterizado con la tipología de domicilios del INEGI, radica en su utilidad para vincular el desarrollo urbano con la gestión del agua. En este sentido, se encontró que existe una regularidad importante en la prestación de los servicios hidráulicos, ya que, los tipos de domicilio que resultaron significativos se vinculan bien con las definiciones de cada uno de los tres usos del agua que contempla el SACMEX, a pesar de ser información generada por dos instituciones diferentes. Este resultado permite saber la demanda que generan los distintos tipos de predios que hay

en las colonias de la ciudad. El potencial que tiene este instrumento radica en que se pueden plantear pautas de desarrollo urbano relacionadas con el consumo de agua.

En el caso del uso doméstico, el modelo que mostró mejor ajuste es el que utiliza las variables de tipo socioeconómico como el Índice de Desarrollo Social (IDS), las viviendas con toma interna, la densidad de vivienda y el suministro intermitente en comparación con el ambiente urbano construido (véase la Nota complementaria 2). En este punto, resaltan tanto el IDS como el suministro intermitente cuyos aportes son importantes para el uso doméstico. En el caso del primer determinante, se trata de un índice que sintetiza varios indicadores, entre ellos, se incluyen variables relacionadas con la provisión de servicios públicos, lo que permite explorar el papel que juega la cobertura de infraestructura en relación con la demanda por uso doméstico de agua. De forma complementaria, el suministro intermitente muestra la magnitud en que se reduce la demanda cuando está presente esta condición de acceso al agua. Estos dos elementos son clave para comprender el comportamiento de la demanda de agua, en este caso de estudio. El modelo espacialmente explícito, local no estacionario mejoró los resultados aportados por la regresión lineal múltiple de mínimos cuadrados, además de proveer otro tipo de información útil para la gestión del agua.

Por su parte, el uso mixto fue caracterizado por varios tipos de domicilios diferentes; destaca el signo positivo que lo relaciona con el suministro intermitente. Esto puede deberse a un grupo de colonias ubicadas en la alcaldía de Iztapalapa, que aparecen como polígonos excluidos para el uso doméstico y que a su vez están contabilizadas para el uso mixto (Figura 2 y 3, Capítulo 2). Estas colonias son abastecidas de manera intermitente, lo que puede ser la causa del signo de este coeficiente. Sobre el uso no doméstico, es importante poner atención en los signos negativos para los coeficientes de micromedición y de densidad de predios. Esto indica que la instalación de medidores y el aumento de predios por hectárea, reducen la cantidad de agua que se utiliza en las colonias de la CDMX, por este tipo de uso. Estas características son útiles para guiar las acciones de gestión de la demanda desde dos rubros distintos, por un lado, el esquema tarifario y por el otro la forma urbana.

Las variables de acceso al agua caracterizadas a partir de los reportes de mala calidad y de falta de agua, además de los reportes de fugas, mostraron un efecto significativo en

varias alcaldías para explicar los usos tres usos del agua. La importancia de este resultado radica en la ubicación de los sitios donde se puede mejorar la prestación del servicio y el impacto que tendría en la demanda. Para el caso de las zonas en donde aparecieron signos positivos con estos determinantes, se debe indagar en una escala más fina si esto es resultado de la agregación espacial o si el reporte de estas incidencias mejoraría la prestación del suministro de agua. En el caso contrario, se muestran las alcaldías donde la demanda se ve disminuida por el acceso agua y por la ocurrencia de fugas, dos elementos muy mencionados en este caso de estudio. Por otra parte, el número de días promedio al bimestre de suministro continuo a nivel de alcaldía no tuvo efecto significativo, lo que contrasta con los resultados a nivel colonia; este punto también debe analizarse con mayor profundidad.

¿Cuánta agua se utiliza en la Ciudad de México?

Se utilizaron diferentes tipos de variables para analizar los usos tres usos del agua que se distribuyen en la Ciudad de México y también se presentaron dos estimaciones de la demanda urbana de agua, una de ellas para el año 2010 y la otra para el periodo 2008-2018. Haciendo un comparativo de ambos resultados, la estimación del año 2010 muestra una diferencia importante con la estimación que cubre el periodo de diez años. En el primer caso, el resultado fue de 20.86 m³/s, mientras que en el segundo se obtuvieron 16.56 m³/s. Es importante mencionar las fuentes de datos que se analizaron; el primer resultado proviene de la solicitud de información pública referenciada como SACMEX (2014) en el Capítulo 2, y el segundo resultado de la solicitud de información que aparece como SACMEX (2021a) en el Capítulo 3. La primera referencia menciona “Consumo anual de agua” y la segunda “Consumo facturado”. Con ello se enfatiza que se trata de dos insumos distintos para la estimación de los modelos, en el caso de SACMEX (2014) puede incluir al consumo promedio mientras que en SACMEX (2021a) no se contempla este aspecto.

Por otra parte, en la Figura 3 del Capítulo 3 se expusieron los datos que aparecen en SACMEX (2019a:62). En dicha publicación se apunta que los datos corresponden a consumo real anual como litros por habitante al día. El caudal anual requerido para el periodo 2009-2017 en promedio fue de 18.52 m³/s comparado con 15.94 m³/s obtenidos con la estimación expuesta en el Capítulo 3 para el mismo periodo. Esta diferencia puede deberse a los

diferentes ajustes que tuvieron los modelos trabajados por tipo de uso de agua y alcaldía, como se observa en el Anexo del Capítulo 3. Esta es una limitación de los modelos propuestos que genera una diferencia promedio entre las dos estimaciones es de 2.58 m³/s anuales; es importante remarcar que en ambos casos se trata de un caudal menor al abastecido que ronda los 31.81 m³/s, lo que plantea la necesidad de comprender las pérdidas sistémicas y su distribución espacial para tener una comprensión local y mejorar la distribución de los recursos hídricos al interior de la ciudad.

La ventaja que tiene la estimación del Capítulo 3 radica en el componente espacial que maneja, que se puede mejorar con la inclusión de otro tipo de variables sobre todo para el uso no doméstico, por ejemplo, el diámetro de las tomas que tienen estos usuarios (véase Nota complementaria 1). La distribución espacial de la demanda urbana de agua presenta patrones espaciales moderados a nivel colonia que no son distinguibles a nivel alcaldía, sin embargo la intensidad de uso de agua presenta patrones espaciales importantes tanto a nivel de alcaldía como de área de continua de abasto externo (véase Figura 4 del Capítulo 4). Se requiere el análisis a nivel de colonia de intensidad de uso del agua que permita ubicar las colonias prioritarias y a su vez determinar si se trata de acciones que refieran a usos internos o a externos de agua, con el fin de fomentar la eficiencia entre los usuarios. También, este análisis se debe contextualizar en términos del esquema tarifario vigente (véase Nota complementaria 1).

Es importante poner atención en dos puntos para plantear acciones de gestión de la demanda de agua. En primer lugar, las acciones se deben enfocar en la intensidad de uso del agua. En segundo lugar, las diferencias entre la demanda y el abasto se deben concebir desde una visión local que permita comprender el estado de las fuentes, así como las características socioeconómicas de las zonas donde se genera la demanda. El reto que se vislumbra concierne a la disminución de la intensidad de uso del agua en las zonas centro, norte y poniente (abastecidas por los sistemas Lerma, Cutzamala y PAI Norte), cuyo efecto debe reflejarse en la disminución de los caudales requeridos.

¿Cómo es la distribución espacial y el comportamiento estacional de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México, así como de su intensidad de uso?

El componente medido de la demanda urbana de agua mostró patrones espaciales significativos que agrupan valores altos en el área central, al norte y al oriente de la ciudad. Parte de la información aportada por el análisis espacialmente explícito, no estacionario para el uso doméstico permitió ver la variación espacial de los coeficientes estimados. En particular destaca la distribución espacial de las viviendas con toma de agua interna y el suministro intermitente (Figuras 5B y 5E, Capítulo 1); en el primer caso destacan las elasticidades altas en la zona norte y centro, que a su vez son los sitios donde la demanda presentaría disminuciones considerables al ocurrir intermitencia en el suministro de agua. Estas colonias pertenecen a las alcaldías abastecidas por los sistemas Cutzamala, Lerma, PAI Norte (Figura 4, Capítulo 4) y posiblemente Chiconautla. Este resultado permite ubicar las colonias que son altamente dependientes de los recursos hídricos externos.

El componente tendencial muestra una disminución del uso del agua en el tiempo, lo que sugiere cierto grado de estabilización en el consumo de agua. Cabe destacar que en términos de estacionalidad los bimestres dos, tres y cuatro muestran un incremento en el componente medido de la demanda urbana de agua (Figura 1 y Figura 2 del Capítulo 3). Además de este comportamiento, los coeficientes exhiben un patrón espacial significativo en las alcaldías que reciben caudales importados de agua. Esta situación contrasta con que la demanda de agua estimada no muestra diferencia significativa entre los bimestres. Estos resultados tienen dos implicaciones: por un lado, los tres usos del agua tienen requerimientos estacionales y espaciales diferenciados (Figura 1, Capítulo 3); por otra parte, los usos exteriores de agua no tienen un efecto importante a nivel de alcaldía.

La intensidad de uso del agua muestra un patrón espacial significativo entre el centro-poniente donde hay valores altos y sur-oriente donde hay valores bajos (Figura 4 Capítulo 3, Figura 3 Capítulo 4). Este resultado se relaciona con las alcaldías que reciben agua de los Sistemas Lerma, Cutzamala y PAI Norte que su vez se caracterizan por mostrar un desbalance entre la cantidad de agua que requieren y la extracción que se hace en sus territorios (Tabla 6 Capítulo 4). Se debe poner atención en particular a la intensidad de uso de agua mostrada en las áreas continuas de abasto externo que aparecen en la Figura 5,

Capítulo 4, en particular al patrón espacial significativo y a sus características (Casa independientes y establecimientos con 251 o más personas empleadas). Los resultados de este análisis apuntan a que las zonas con alta intensidad de uso del agua se caracterizan por tamaño del hogar bajo y por zonas con alta densidad, que van de la mano con aportes externos. De ahí que, las estrategias se deben centrar en disminuir la intensidad de uso del agua en las alcaldías de Cuajimalpa, Miguel Hidalgo, Azcapotzalco, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero.

Es preciso complementar estos análisis con la medición de la elasticidad de los precios por la prestación del servicio de suministro para los tres usos, para evaluar el impacto que tienen los esquemas tarifarios (véase Nota complementaria 1). Si bien, los coeficientes obtenidos con la micromedición dan cierta luz al respecto, la valoración en términos monetarios mejoraría tanto la comprensión de las acciones desde la gestión de la demanda como la recaudación del organismo operador. Además de complementar el cálculo de la demanda con las elasticidades de los precios, se debe analizar la dinámica de extracción de las fuentes y su estado, debido a la fuerte dependencia que tienen las zonas que generan mayor intensidad de uso de agua, las cuales son los sitios donde se asienta el mayor número de personal empleado en la ciudad. Por otra parte, es necesario estudiar los flujos subterráneos que alimentan los sistemas PAI Norte y Chiconautla, que son un sustento importante de la zona centro-norte de la ciudad.

En contraposición, la zona sur se destaca como un área de provisión que registra un balance positivo entre la demanda urbana de agua estimada y la extracción, principalmente de agua subterránea. En esta parte de la ciudad, la prioridad debe centrarse en las alcaldías que conforman el Tercer Contorno (Figura 2, Capítulo 2) para la intensidad del uso no doméstico. Estas tres alcaldías se caracterizan por contar con baja micromedición para este uso y también baja densidad de los predios. De acuerdo con los coeficientes beta calculados, las estrategias para aumentar la micromedición pueden tener gran impacto en la disminución de la intensidad de uso del agua. Se debe tener en mente el resultado expuesto en la Figura 5D, Capítulo 1, donde se muestra que las colonias ubicadas en esta zona generarían aumento de agua de la mano de la densidad; si bien se hace referencia al uso doméstico, es posible que el uso no doméstico pueda tener un comportamiento similar.

El rol del crecimiento urbano debe comprenderse desde los requerimientos locales de demanda urbana de agua y de intensidad de uso. Por ello, la atención se debe poner en las alcaldías de Milpa Alta, Cuajimalpa, Benito Juárez y Miguel Hidalgo que tuvieron un crecimiento poblacional por encima del 10% al comparar los datos censales del año 2010 con los del año 2020. En este sentido, se debe tener en cuenta que cada una representa un reto diferente para atender; por una parte Cuajimalpa y Miguel Hidalgo muestran alta intensidad de uso de agua (Figura 4, Capítulo 3), mientras que ésta última junto con Benito Juárez tienen altos requerimientos anuales de agua (Tabla 6, Capítulo 3). En cuanto a Milpa Alta, se localiza en el Suelo de Conservación y en el Tercer Controno (PGDUDF). Por una parte, esta zona tiene un balance positivo y baja intensidad para los tres usos, sin embargo el aumento de densidad de vivienda causaría un aumento en la demanda por uso doméstico (Figura 5D, Capítulo 1), lo que plantea que sea importante como foco de atención y más en el contexto del crecimiento poblacional en esta zona.

Las alcaldías de Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco se encuentran en una situación similar a Milpa Alta, ya que mostraron un crecimiento poblacional entre el 6 y el 9% ocurrido entre los años censales. Las implicaciones que tiene este fenómeno se relacionan con la provisión de agua hacia la ciudad, ya sea por la extracción (Tabla 2, Capítulo 4) así como por la recarga. Se debe indagar en las razones que guían este crecimiento poblacional, dada la relevancia que tiene estas alcaldías en términos de la gestión del agua. Además, es preciso notar que el suministro intermitente en esta zona prevalece (Tabla 9, Capítulo 4) y que es mayor que en el resto de la CDMX. Esta zona es la que requiere mayor atención y análisis por la variada cantidad de retos relativos a la gestión del agua, la dinámica poblacional y el desarrollo urbano.

¿Cuáles son las zonas prioritarias para implementar acciones de gestión de la demanda de agua en la Ciudad de México?

En este sentido, se debe destacar que los retos que enfrenta la ciudad son variados y su abordaje diferenciado. Por una parte, se debe atender la disminución de la intensidad de uso del agua en las alcaldías de Cuajimalpa, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Azcapotzalco y Gustavo A. Madero, poniendo énfasis en las tres primeras además

de Benito Juárez. Por otro lado, se debe poner atención en la relación que guardan la demanda urbana de agua y el crecimiento poblacional en las alcaldías de Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco, que a pesar de no mostrar niveles altos de demanda ni de intensidad de uso del agua, se encuentran en la principal zona de recarga y de extracción de agua, lo que les da un papel fundamental en la gestión del agua.

Nota complementaria 1. Sobre el uso del concepto de demanda urbana de agua

Resumen

El presente apartado tiene como fin profundizar algunos aspectos sobre el uso del término de demanda urbana de agua, utilizado a lo largo de los cuatro capítulos precedentes, además de exponer un análisis adicional sobre la relación entre el esquema tarifario vigente en la Ciudad de México y los tres usos del agua que se manejan en la legislación local. En primer lugar, se muestra una definición de la demanda urbana de agua desde la visión de los organismos operadores; para ello se hace referencia a una tabla que sintetiza el uso del término en algunos estudios realizados en diferentes ciudades del mundo. Posteriormente, se expone el análisis que relaciona los datos medidos de los usos doméstico y mixto de agua, para el año 2010, a nivel colonia, con el número de manzanas clasificadas según el Índice de Desarrollo por Manzana de la Secretaría de Finanzas de la CDMX. Con respecto al uso no doméstico, el análisis contempla la relación entre el número de tomas según su diámetro con este tipo de uso del agua, ya que, en este caso, es como se realiza el cobro por la prestación del suministro de agua. Estos análisis representan una manera de vincular el esquema tarifario actual con el consumo de agua en la ciudad.

Demanda urbana de agua

El concepto de demanda de agua, como lo exponen Billings y Jones (2008), hace referencia al volumen necesario que requiere un organismo operador para cubrir el suministro de los usuarios en un tiempo determinado. Estos autores mencionan que esta definición proviene de una visión centrada en el abastecimiento público de agua, que también incluye las pérdidas de caudales y el agua no contabilizada. En este contexto, cuando ambos componentes son inexistentes, la demanda de agua es equivalente al volumen de agua producida. En esta misma publicación se menciona que en términos económicos la definición de demanda corresponde a: “[el] horario o curva que describe la cantidad que un cliente está dispuesto a

pagar por un bien o servicio a diferentes precios, en igualdad de condiciones”⁹ (Billings y Jones, 2008: 4), en este caso se refiere al agua que proveen los organismos operadores.

Por su parte, en la Bilioteca Digital de MAPAS¹⁰ de la Comisión Nacional del Agua (disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>), en el *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado* (Libro 4), se define a la demanda urbana de agua como “Cantidad de agua requerida en las tomas para consumo de una localidad o área de proyecto, considerando los diferentes usuarios (domésticos, comerciales, industriales, turísticos, entre otros) que ahí tienen lugar, más las pérdidas físicas del sistema.” (CONAGUA, 2019a: 7). De forma similar a Billing y Jones (2008), en el *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Estructuras Tarifarias* (Libro 54) se plantea, con respecto de la demanda que: “Desde el punto de vista teórico, el consumo de agua de un usuario depende de un conjunto de variables. Entre ellas resalta el ingreso del usuario y el precio del servicio que recibe”, por lo que queda enfatizado el rol que juegan los esquemas tarifarios en la gestión urbana del agua, sin embargo en esta misma publicación se menciona que “[En el Organismo Operador], si se quiere calcular la demanda para cada año, ésta se obtiene del resultado del consumo más las pérdidas de agua potable” (CONAGUA, 2019b: 44).

En este mismo sentido, la publicación de Billings y Jones (2008) plantean que el análisis de pronóstico de la demanda urbana de agua (*urban water-demand forecasting*) se refiere a: “el proceso para hacer predicciones sobre el uso futuro del agua basándose en el conocimiento histórico de los patrones de uso del agua” (Billings y Jones, 2008: 1). Estos procedimientos se han conjuntado en el campo de la gestión de la demanda de agua, que se centra en: la disminución de caudales necesarios para las ciudades, la reducción de los caudales que se pierden en el sistema, entre otros puntos (Baumann y Boland, 1997; Brooks, 2007; Kayaga y Smout, 2011). A partir de estos planteamientos, se han realizado varios trabajos sobre el tema que se pueden encontrar desde los años 70 (House-Peters y Chang, 2011). En la Tabla 8, ubicada después del apartado de referencias, se sintetizan algunos

⁹ El texto original: “the schedule or curve describing the amount the consumer is willing to purchase of a good or a service at various prices, other thing being equal” (Billings y Jones, 2008:4).

¹⁰ Hace referencia al acrónimo Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento y no a un repertorio cartográfico.

estudios que se han llevado a cabo en diferentes ciudades del mundo, destacando los objetivos que tuvieron, las variables que abordaron, sus áreas de estudio y sobre todo los términos que utilizaron como su objeto de estudio: consumo, uso o demanda de agua.

Los estudios que se revisaron cubren el periodo del año 2000 al 2017. En general, los objetivos planteados se refieren al efecto que tienen distintos tipos de variables independientes sobre el consumo de agua. La mayoría de las publicaciones que utilizan el término de demanda de agua incluyen el precio y se caracterizan por utilizar técnicas que no son espacialmente explícitas. Sin embargo, en los casos de Downs *et al.* (2000) para la Ciudad de México y de Turner e Ibes (2011) para Phoenix, EUA, se refieren al término “demanda de agua” y no se incluye el precio como variable explicativa. Es preciso remarcar que, en casi todos los artículos en los que se ocupan datos en unidades espaciales no se incluye el precio que se paga por la prestación de los servicios hidráulicos y se utiliza el término de consumo de agua. En este sentido, los estudios de Shandas y Parandvash (2010) y de Turner e Ibes (2011) hacen mención en sus títulos a la “gestión de la demanda de agua” mientras que, en el contenido de sus publicaciones refieren al “consumo de agua”. Por su parte, Wentz y Gober (2007) y House-Peters *et al.* (2010) cuentan con apartados nombrados como “demanda de agua” a pesar de que el objeto de estudio se centra en el “consumo de agua”. En ninguno de estos casos se hace inclusión del precio como variable independiente.

Esta revisión resalta que el objeto de estudio para la gestión de la demanda de agua en las ciudades se enfoca en el uso o consumo de agua, incluyendo o no el precio (Wentz y Gober, 2007; Billings y Jones, 2008; House-Peters, Pratt, y Chang, 2010; Shandas y Parandvash, 2010; Turner e Ibes, 2011). Por otro lado, a partir de las definiciones que se exponen en Billings y Jones (2008), CONAGUA (2019a) y CONAGUA (2019b) se manifiesta la existencia de dos visiones con respecto a la demanda urbana de agua; una que se relaciona con las actividades de los organismos operadores y la otra con los esquemas tarifarios, vinculada a la visión de la teoría económica. La presente investigación se centró en una visión desde el abastecimiento público y el quehacer de los organismos operadores, teniendo como eje principal el análisis espacial y temporal para generar un diagnóstico de la demanda urbana de agua en la Ciudad de México. Se dejó de lado el tema del esquema tarifario para poner énfasis en el componente medido y en el agua no contabilizada de la

ciudad, como lo marcan Bell (2018) y CONAGUA (2019a; 2019b). En cuanto al componente de pérdidas se realizó su contextualización, comparándolo con el abastecimiento total de agua de la ciudad.

Tomando como referencia los estudios revisados y sintetizados en la Tabla 8, se debe poner atención en que los análisis de la demanda del agua que incluyen el precio no han contemplado una visión espacial, posiblemente por la complejidad técnica que ello implica, dado que los fenómenos espaciales tienden a variar según su contexto territorial específico (Fotheringham *et al.*, 2002), además de que los esquemas tarifarios cuentan con diferentes criterios para su establecimiento. En el siguiente apartado se hace una propuesta para abordar el caso de la capital mexicana, desde una visión que conjunta el manejo de datos en unidades espaciales para relacionar el esquema tarifario vigente y los tres usos del agua que contempla la legislación actual -uso doméstico, mixto y no doméstico- (ALDF, 2003).

Análisis de la demanda urbana de agua según el esquema tarifario

Desde el año 2009 se modificó el esquema tarifario de cobro por la prestación de los servicios hidráulicos en la Ciudad de México, como consecuencia de la disminución en los caudales provenientes del Sistema Cutzamala (Jiménez *et al.*, 2011; SACMEX, 2019a). Ante esta situación se diseñó un esquema tarifario de bloques incrementales, mediante el cual se asignan los subsidios a la tarifa del agua de manera diferenciada (Rodríguez-Tapia *et al.*, 2019). El objetivo que se persigue con este tipo de esquemas tarifarios se centra en fomentar la conservación del agua, por lo que, se cobran tarifas más altas cuando aumenta el consumo; en primer lugar se establece un bloque con las cantidades que se determinan como necesarias y que se deben proveer a todos los usuarios, posteriormente el cobro va en aumento hasta llegar a un bloque que castiga los consumos altos (Billings y Jones, 2008).

Históricamente la tarifa del agua en la CDMX ha estado subsidiada al grado de ser considerada como un bien gratuito (Rodríguez-Tapia *et al.*, 2019). Como respuesta a la crisis de abastecimiento que tuvo lugar en el año 2009, se creó el Índice de Desarrollo por Manzana (IDM) a cargo de la Secretaría de Finanzas local, que clasifica a cada manzana de la ciudad en cuatro categorías: alto, medio, bajo y popular (SACMEX, 2019a). Este instrumento se utiliza para asignar los subsidios a cada manzana de forma incremental, para realizar el cobro

a los usuarios domésticos y mixtos que cuentan con medidor o que se ubican en una colonia con al menos 70% de consumo medido. Por su parte, el uso no doméstico se cobra según el diámetro de las tomas instaladas y no cuenta con subsidios (GDF, 2009). De acuerdo con Jiménez *et al.* (2011:111), el IDM se compone por tres indicadores: (1) Indicador de Desarrollo (que sintetiza diez variables); (2) Indicador de Patrimonio, donde se añade el valor catastral promedio de las viviendas por manzana; y (3) Indicador de Ingresos, que refiere al nivel promedio de ingresos por manzana. Con respecto al primer indicador, las variables consideradas son las siguientes:

- Población de 18 años o más sin educación media superior.
- Hijos nacidos vivos de mujeres en edades de 12 a 19 años.
- Población no derechohabiente a servicios de salud.
- Viviendas particulares habitadas sin refrigerador.
- Viviendas particulares habitadas sin lavadora.
- Viviendas particulares habitadas que tienen piso sin algún recubrimiento.
- Viviendas con un solo cuarto.
- Nivel de hacinamiento (4 o más habitantes por dormitorio).
- Sanitario con descarga manual de agua.
- Sin agua entubada dentro de la vivienda.

Cabe destacar que el IDM no contempla entre sus variables al consumo medido de agua por manzana. Por otra parte, la tarifa final con la que se realizan los cobros a los usuarios se vota en el Congreso de la Ciudad de México, en donde el SACMEX, como un organismo desconcentrado de la Secretaría del Medio Ambiente local, solamente puede realizar propuestas (ALDF, 2003; SACMEX, 2019a).

La gran ventaja que presenta este esquema tarifario es que se trata de un instrumento espacialmente explícito; la gran desventaja es que la estructura de bloques incrementales es diferente para cada una de las manzanas que conforman las colonias, por lo que, el cálculo de un promedio a este nivel de agregación espacial puede anular el efecto que tienen los bloques diferenciados sobre el consumo de agua. Adicionalmente, la tarifa del agua no varía durante el año y no tiene entre sus criterios la estacionalidad del consumo. La propuesta que se hace en este apartado, consiste en evaluar la relación que hay entre los usos doméstico y

mixto de agua con el número de manzanas, según su clasificación del IDM; para el caso del uso no doméstico se relacionan los datos de consumo con el número de tomas según el tamaño de sus diámetros (SACMEX, 2014). El análisis se basa en las colonias de SEDUVI (2015), donde se agregaron los datos correspondientes al año 2010.

Los tres usos de agua se seleccionaron como variables dependientes para estimar tres modelos de regresión lineal múltiple mediante el principio de mínimos cuadrados (OLS). Entre las variables independientes, se contemplaron las manzanas clasificadas según el IDM (GDF, 2009), los diámetros de las tomas no domésticas, además del número de usuarios con medidor (SACMEX, 2014), el tamaño promedio del hogar (INEGI, 2012) y las colonias que son abastecidas por tandeo (GDF, 2010). Se siguieron los siguientes pasos:

1. Se realizaron las matrices de correlaciones entre las variables independientes para detectar problemas de multicolinealidad entre ellas.
2. Se estimaron los coeficientes beta para los tres modelos de uso del agua, a nivel colonia.
3. Se midió el factor de inflación de la varianza de los coeficientes beta estimados.
4. Se analizó la distribución de los residuales de cada uno de los modelos.
5. Se compararon los pronósticos generados por el modelo con los datos medidos, a nivel de alcaldía.

En el caso particular de la variable tandeo, se refiere al suministro intermitente de agua en las colonias, se midió de forma categórica con valores de cero y uno según el listado que aparece en GDF (2010). Las colonias que fueron marcadas con uno, son las que experimentan este tipo de suministro.

Resultados

En la Tabla 1 se muestra la matriz de correlaciones entre las variables independientes utilizadas para explicar el uso doméstico de agua a nivel colonia en la Ciudad de México. Las manzanas con IDM alto y medio muestran una relación negativa con el tamaño del hogar, a diferencia de las manzanas con IDM bajo y popular. Estos dos tipos de manzana, también tienen una relación positiva con la variable de tandeo. Por otro lado, las manzanas

clasificadas con IDM medio y bajo tienen mayor correlación con los usuarios que cuentan con medidor, en comparación con las otras dos categorías. Dado que no hubo altos coeficientes de correlación, estas variables fueron utilizadas en la estimación de los coeficientes beta del modelo de regresión lineal múltiple (OLS), cuyos resultados están en la Tabla 2.

Tabla 1 Matriz de correlaciones de las variables independientes para explicar el uso doméstico de agua a nivel colonia, en la Ciudad de México para el año 2010.

	Usuarios con medidor doméstico	Manzanas IDM alto	Manzanas IDM bajo	Manzanas IDM medio	Manzanas IDM popular	Tamaño del hogar	Tandeo
Usuarios con medidor doméstico	1						
Manzanas IDM alto	0.34	1					
Manzanas IDM bajo	0.48	-0.12	1				
Manzanas IDM medio	0.46	0.20	0.37	1			
Manzanas IDM popular	0.33	-0.05	0.52	0.10	1		
Tamaño del hogar	-0.20	-0.34	0.11	-0.07	0.20	1	
Tandeo	-0.05	-0.09	0.13	0.04	0.21	0.17	1

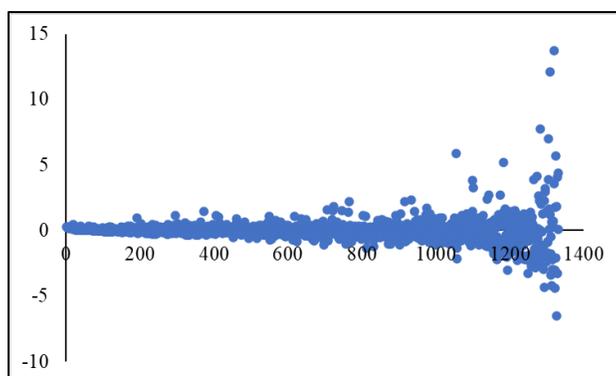
Las variables seleccionadas, que resultaron significativas, explican un 84% del uso doméstico de agua (Tabla 2). La información que aportan los coeficientes señala que un usuario adicional con medidor causaría 206 m³ anuales, en promedio. En cuanto a las manzanas clasificadas con un IDM alto, en promedio consumen 4,633.57 m³ anuales de agua. Sobre estos resultados, destaca que las manzanas clasificadas con IDM popular generan mayor consumo de agua que aquéllas con IDM bajo. En cuanto al tandeo, tuvo un signo negativo que indica que las colonias abastecidas de este modo consumen en promedio 30,000 m³ anuales menos que las suministradas de manera continua. Los factores de inflación de la varianza en todos los casos estuvieron por debajo de cuatro, lo que señala que no hay multicolinealidad. El análisis se realizó con datos de 1,324 colonias. En la Figura 1 aparece

la distribución de los residuales estándar del modelo estimado para explicar el uso doméstico de agua. Se observa que presentan una tendencia que sugiere heterocedasticidad, lo que limita sus capacidades predictivas.

Tabla 2 Coeficientes beta, error estándar, valor de t, valor de p e índice de inflación de la varianza del modelo de regresión múltiple OLS que explica el uso doméstico anual de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.

Variable	Coefficiente beta	Error estándar	Valor de t	Valor de p	Factor de Inflación de la Varianza
Constante	-12,920.65	4,976.00	-2.60	0.01	
Usuarios con medidor doméstico	206.71	4.28	48.33	< 2e-16	1.84
Manzanas IDM Alto	4,633.57	292.85	15.82	< 2e-16	1.30
Manzanas IDM Bajo	702.13	326.66	2.15	0.03	1.91
Manzanas IDM Medio	3,014.32	263.59	11.44	< 2e-16	1.38
Manzanas IDM Popular	1,107.37	228.01	4.86	0.00	1.48
Tandeo	-30,127.99	12,957.01	-2.33	0.02	1.08
R ²	0.84				
n	1,324				

Figura 1 Residuales estándar del modelo de regresión lineal múltiple (OLS) que explica el uso doméstico de agua en las colonias de la Ciudad de México. Año 2010.



La Tabla 3 contiene la matriz de correlaciones de las variables independientes para el modelo de regresión múltiple (OLS) que explica el uso mixto de agua. En general, es similar al caso del uso doméstico; sin embargo, en esta tabla se puede apreciar que las manzanas con IDM medio tienen alta correlación con los usuarios con medidor. En la Tabla 4 aparecen los coeficientes beta estimados para este uso.

Tabla 3 Matriz de correlaciones de las variables independientes para explicar el uso mixto de agua a nivel colonia, en la Ciudad de México para el año 2010.

	Usuarios con medidor mixto	Manzanas IDM alto	Manzanas IDM bajo	Manzanas IDM medio	Manzanas IDM popular	Tamaño del hogar	Tandeo
Usuarios con medidor mixto	1						
Manzanas IDM alto	0.20	1					
Manzanas IDM bajo	0.58	-0.12	1				
Manzanas IDM medio	0.70	0.21	0.35	1			
Manzanas IDM popular	0.35	-0.06	0.52	0.07	1		
Tamaño del hogar	-0.04	-0.36	0.12	-0.07	0.22	1	
Tandeo	-0.01	-0.09	0.11	0.03	0.20	0.16	1

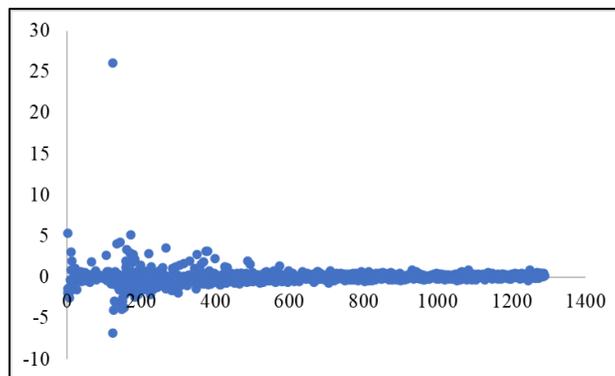
Tabla 4 Coeficientes beta, error estándar, valor de t, valor de p e índice de inflación de la varianza del modelo de regresión múltiple OLS que explica el uso mixto anual de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.

Variable	Coefficiente beta	Error estándar	Valor de t	Valor de p	Factor de Inflación de la Varianza
Constante	61,202.19	11,259.18	5.44	0.00	
Usuarios con medidor mixto	296.89	13.76	21.57	< 2e-16	2.88
Manzanas IDM Alto	877.95	93.46	9.39	< 2e-16	1.29
Manzanas IDM Bajo	-328.27	104.46	-3.14	0.00	1.95
Manzanas IDM Medio	564.37	107.14	5.27	0.00	2.12

Manzanas IDM Popular	319.38	72.04	4.43	0.00	1.58
Tamaño del hogar	-18,198.81	2,959.66	-6.15	0.00	1.22
Tandeo	7,063.25	4,142.60	1.71	0.09	1.08
R ²	0.63				
n	1,282				

En el caso del uso mixto, todas las variables independientes que se contemplaron resultaron significativas. Las manzanas con IDM bajo mostraron un signo negativo, mientras que las de tipo popular tienen un signo positivo. Es importante poner atención en el tamaño del hogar, que tuvo un signo negativo al relacionarse con el uso mixto, de igual forma y contrario a lo esperado, el tandeo apareció con signo positivo. El modelo tuvo un nivel de explicación de 63% y se utilizaron 1,282 colonias en las que se encuentran instaladas este tipo de tomas. En cuanto al factor de inflación de la varianza, todos los coeficientes estimados tuvieron un valor más pequeño de cuatro lo que sugiere que no hay efecto de multicolinealidad entre las variables del modelo. En la Figura 2 aparece la distribución de los residuales estándar, que muestran un dato atípico y en general no exhiben una tendencia que sugiera heterocedasticidad.

Figura 2 Residuales estándar del modelo de regresión lineal múltiple (OLS) que explica el uso mixto de agua en las colonias de la Ciudad de México. Año 2010.



La Tabla 5 muestra la matriz de correlaciones entre las variables independientes que se utilizaron para estudiar el uso no doméstico. Se observa que hay altas correlaciones entre las tomas de 13, 19, 25, 38 y 51 milímetros con los usuarios que cuentan con medidor. Se

quitaron estas variables y quedaron los usuarios con medidor. En la Tabla 6 están los resultados obtenidos para la estimación de los coeficientes beta del uso no doméstico; aparecen las variables que resultaron significativas y que tuvieron un factor de inflación de la varianza menor a cuatro. Como resultado, los usuarios no domésticos con tomas de 64, 152 y 304 milímetros generan una reducción del consumo promedio de las colonias en donde se ubican; mientras que, los usuarios con medidor, en promedio, incrementan en 365 m³ el consumo anual. Esto señala el efecto que tienen los pequeños usuarios. El modelo explica un 85% de la variable dependiente, que se estimó con datos provenientes de 1,299 colonias.

Tabla 5 Matriz de correlaciones de las variables independientes para explicar el uso no doméstico de agua a nivel colonia, en la Ciudad de México para el año 2010.

	Usuarios con medidor no doméstico	Diámetro 13 mm	Diámetro 19 mm	Diámetro 25 mm	Diámetro 32 mm	Diámetro 38 mm	Diámetro 51 mm	Diámetro 64 mm	Diámetro 76 mm	Diámetro 102 mm	Diámetro 152 mm	Diámetro 202 mm	Diámetro 203 mm	Diámetro 254 mm	Diámetro 304 mm	Diámetro 997 mm
Usuarios con medidor no doméstico	1															
Diámetro 13 mm	0.95	1														
Diámetro 19 mm	0.82	0.73	1													
Diámetro 25 mm	0.88	0.79	0.91	1												
Diámetro 32 mm	0.67	0.62	0.73	0.67	1											
Diámetro 38 mm	0.73	0.64	0.87	0.81	0.68	1										
Diámetro 51 mm	0.76	0.68	0.74	0.73	0.60	0.74	1									
Diámetro 64 mm	0.40	0.41	0.34	0.35	0.34	0.35	0.38	1								
Diámetro 76 mm	0.65	0.56	0.72	0.68	0.59	0.74	0.74	0.43	1							
Diámetro 102 mm	0.28	0.25	0.19	0.25	0.25	0.25	0.30	0.17	0.35	1						
Diámetro 152 mm	0.20	0.19	0.06	0.12	0.13	0.09	0.20	0.08	0.14	0.58	1					
Diámetro 202 mm	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	1				
Diámetro 203 mm	0.16	0.16	0.11	0.16	0.05	0.11	0.12	0.00	0.15	0.15	0.26	0.00	1			
Diámetro 254 mm	0.16	0.16	0.12	0.18	0.05	0.12	0.14	0.00	0.17	0.14	0.12	0.00	0.89	1		
Diámetro 304 mm	0.45	0.44	0.14	0.29	0.06	0.11	0.29	0.22	0.21	0.17	0.25	0.00	0.63	0.71	1	
Diámetro 997 mm	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1

Tabla 6 Coeficientes beta, error estándar, valor de t, valor de p e índice de inflación de la varianza del modelo de regresión múltiple OLS que explica el uso no doméstico anual de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.

Variable	Coeficiente beta	Error estándar	Valor de t	Valor de p	Factor de Inflación de la Varianza
Constante	8,760.76	1,886.98	4.64	3.8E-06	
Usuarios con medidor no doméstico	365.83	14.39	25.43	< 2.0E-16	3.02
Tomas de 32 mm	23,884.37	1,372.04	17.41	< 2.0E-16	2.25
Tomas de 64 mm	-37,476.17	11,236.55	-3.34	8.8E-04	1.28
Tomas de 76 mm	57,670.33	3,154.46	18.28	< 2.0E-16	2.08
Tomas de 102 mm	49,895.84	4,066.69	12.27	< 2.0E-16	1.70
Tomas de 152 mm	-16,495.89	9,639.66	-1.71	8.7E-02	1.59
Tomas de 304 mm	-321,634.34	55,811.13	-5.76	1.0E-08	1.52
R ²	0.85				
n	1,299				

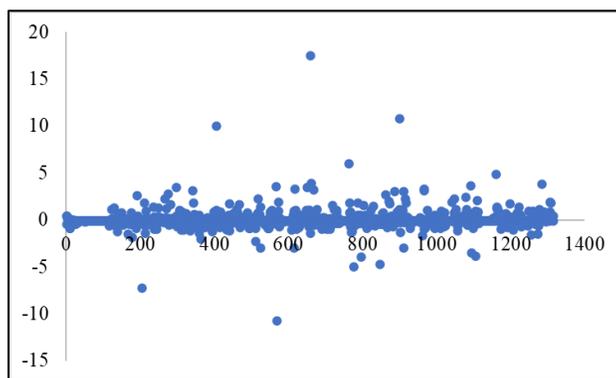
Tabla 7 Total de tomas instaladas en el año 2010 con la tarifa correspondiente a uso no doméstico según el tamaño de su diámetro.

Diámetro	Total de tomas instaladas	Tarifa bimestral en pesos (GDF, 2009)
13 mm	104,896	1,816.00
19 mm	12,330	15,439.50
25 mm	9,115	30,019.50
32 mm	604	46,318.50
38 mm	1,418	67,762.50
51 mm	1,907	180,124.50
64 mm	30	180,124.50
76 mm	219	523,219.50
102 mm	125	523,219.50
152 mm	37	3,139,326.00
202 mm	1	3,830,910.00
203 mm	3	3,830,910.00
254 mm	1	4,520,286.00
304 mm	2	4,794,768.00
997 mm	12	4,794,768.00

En la Figura 3 aparece la distribución de los residuales estándar obtenidos mediante la estimación del modelo de regresión lineal múltiple (OLS); se observan algunos datos

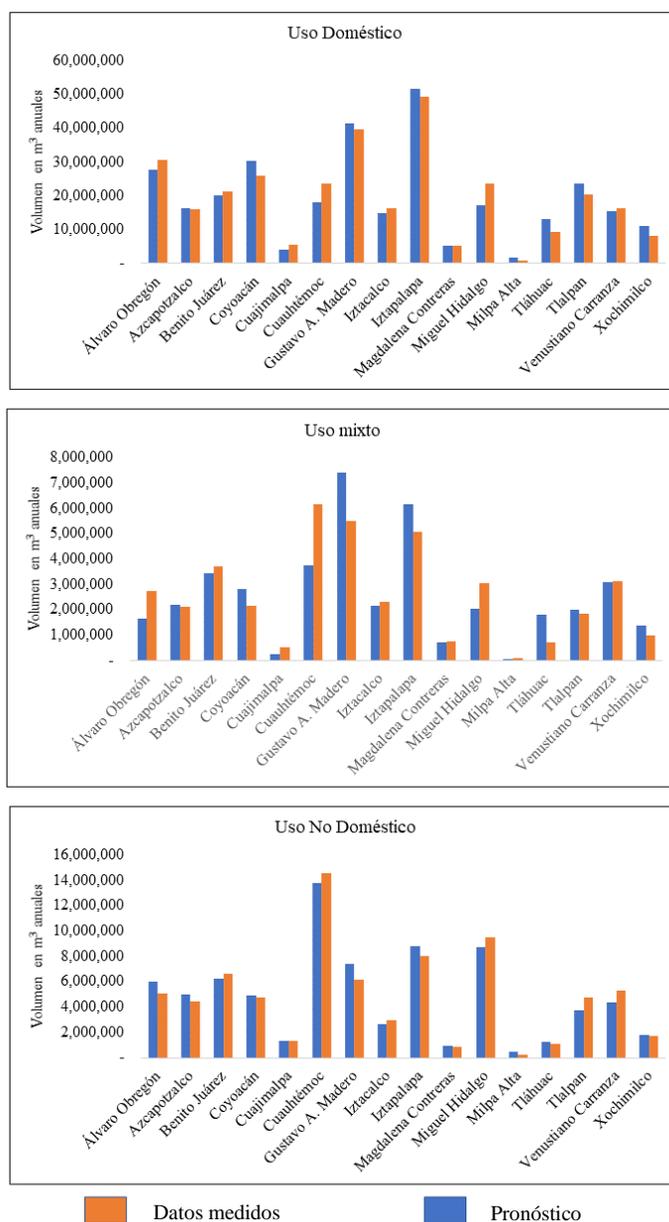
atípicos pero en general estas observaciones se distribuyen alrededor del cero sin mostrar una tendencia aparente, lo que sugiere que no hay heterocedasticidad. Para ampliar el análisis, en la Tabla 7 se apuntan las tarifas vigentes para el año 2010 según GDF (2009). Destaca que los coeficientes negativos del modelo corresponden a los sitios que tienen pocas tomas registradas con esos diámetros en la ciudad (64, 152 y 304 milímetros).

Figura 1 Residuales estándar del modelo de regresión lineal múltiple (OLS) que explica el uso mixto de agua en las colonias de la Ciudad de México. Año 2010.



En la Figura 4 aparece una comparación entre el pronóstico generado por el modelo de regresión lineal (OLS) y los datos medidos para cada uno de los tres usos del agua, en cada una de las alcaldías. El ajuste es variable entre las alcaldías, en algunos casos se presenta subestimación y en otros sobreestimación.

Figura 4 Consumo de agua medido y consumo predicho por los modelos de regresión lineal múltiple para la Ciudad de México, 2010.



Comentarios finales

El resultado de las manzanas clasificadas con IDM popular que causan mayor consumo en comparación las de IDM bajo, puede ser resultado de una clasificación deficiente como se señala en SACMEX (2019a). En este sentido, el argumento que se expone en Rodríguez-Tapia *et al.* (2019) pone en perspectiva que los hogares ubicados en las manzanas con IDM

alto son los que se benefician del subsidio a las tarifas de agua, de igual manera esta situación puede reflejarse en algunas manzanas con altos consumos y con clasificación de IDM popular. Por otra parte, la correlación negativa entre el tamaño del hogar y las manzanas con IDM alto y medio, apunta a la necesidad analizar la intensidad de uso de agua en las colonias donde se concentran este tipo de manzanas. Por otra parte, en SACMEX (2019a) se expone que en la CDMX se ha reducido el consumo de agua, atribuyendo este efecto al nuevo esquema tarifario. En este punto es preciso ahondar sobre el efecto de los bloques incrementales en las manzanas clasificadas con IDM alto y medio, de igual forma hace falta evaluar la evolución del consumo a esta escala, para lo que se requeriría un análisis de panel data.

En el caso del uso mixto, el signo negativo del tamaño del hogar sugiere que las colonias con mayor hacinamiento son abastecidas de esta forma. El signo positivo del tandeo puede deberse al registro de usuarios mixtos en las colonias ubicadas al oriente del alcaldía Iztapalapa, en específico en la Sierra de Santa Catarina, estas colonias se caracterizan por ser abastecidas mediante suministro intermitente. Se requiere poner mayor atención en el signo negativo entre las manzanas con IDM bajo y el uso mixto. En general, los coeficientes positivos para los usuarios con medidor en el caso del uso doméstico y del uso mixto sugieren que el esquema tarifario presenta limitaciones en lograr que la medición reduzca el consumo de agua. Por ello, se debe evaluar el efecto de los bloques incrementales y la evolución del esquema tarifario con respecto del consumo de agua.

Un punto importante para una futura discusión, consiste en cuestionar la capacidad redistributiva del esquema tarifario a pesar de su posible utilidad en la reducción del consumo de agua, a la luz de los resultados indicados en Rodríguez-Tapia, *et al.* (2019), que señalan que los hogares con mayores ingresos se benefician de los subsidios. En cuanto al uso no doméstico, los resultados obtenidos se deben complementar con las actividades productivas que realizan los diferentes usuarios, para tener una mejor comprensión de los signos negativos y positivos ligados a los diámetros de las tomas; lo que contribuiría con entender el rol de los usuarios pequeños y grandes que hay en la ciudad.

Referencias

- ALDF [Asamblea Legislativa del Distrito Federal]. (2003). *Ley de Aguas del Distrito Federal*. México, DF: Gobierno del Distrito Federal.
- Arbués, F., y 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. doi: <https://doi.org/10.1080/00420980601038255>
- Ashoori, N., Dzombak, D., y 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., y Pradhan, P. (2007). A multivariate econometric approach for domestic water demand modeling: An application to Kathmandu, Nepal. *Water Resource Management*, 21, 573-589. doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9030-6>
- Baumann, D., y Boland, J. (1997). The Case for Managing Urban Water. In D. Baumann, J. Boland, y W. Hanemann, *Urban Water Demand Management and Planning* (pp. 1-30). Nueva York: Mc Graw Hill.
- Bell, S. (2018). *Urban Water Sustainability. Constructing infrastructure for cities and nature*. Nueva York: Routledge.
- Billings, R., y Jones, C. (2008). *Forecasting Urban Water Demand* (2 ed.). Denver: American Water Works Association.
- Chang, H., Bonnette, M., Stoker, P., Crow-Miller, B., y 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., y Shandas, V. (2010). Spatial variation of Single-Family Residential water consumption in Portland, Oregon. *Urban Geography*, 31(7), 953-972. doi: <https://doi.org/10.2747/0272-3638.31.7.953>
- CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2019a). *Biblioteca Digital de MAPAS*. (S. d. Naturales, Editor) Recuperado el 26 de 10 de 2021, de Manual de Agua Potable,

Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado. Libro 4: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>

CONAGUA [Comisión Nacional del Agua]. (2019b). *Biblioteca Digital de MAPAS*. (S. d. Naturales, Editor) Recuperado el 2021 de 10 de 26, de Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Estructuras Tarifarias. Libro 54: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro54.pdf>

De Maria André, D., y Carvalho, J. (2014). Spatial Determinants of Urban Residential Water Demand in Fortaleza, Brazil. *Water Resources Management*, 28, 2401-2414.

Domene, E., y 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., y Suffet, I. (2000). Sustainability of least cost policies for meeting Mexico City's future water demand. *Water Resources Research*, 36(8), 2321-2339. doi: <https://doi.org/10.1029/1999WR900234>

Fotheringham, A., Brunson, C., y Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression: the analysis of spatially varying relationships*. New York: Wiley.

GDF [Gobierno del Distrito Federal]. (2009). Administración Pública del Distrito Federal. Secretaría de Finanzas. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, págs. 69-76.

GDF [Gobierno del Distrito Federal]. (2010, May 13). Administración Pública del Distrito Federal. Secretaría de Finanzas. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, pp. 4-9.

Ghavidelfar, S., y 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., y Chang, H. (2011). Urban water demand modeling: Review of concepts, methods and organizing principles. *Water Resources Research*, 47(5). doi: <https://doi.org/10.1029/2010WR009624>

- House-Peters, L., Pratt, B., y 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)*. Retrieved February 01, 2017, from <http://www.inegi.org.mx/est/scince/scince2010.aspx>
- Jiménez, B., Gutiérrez, R., Marañón, B., y González, A. (2011). *Evaluación de la política de acceso al agua potable en el Distrito Federal*. México: Evalúa DF-PUEC-UNAM.
- Kayaga, S., y Smout, I. (2011). *Water Demand Management in the City of the Future*. Leicestershire: WEDC, Loughborough University.
- Kontokosta, C., y 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.
- Mitchell, G. (2006). Applying Integrated Urban Water Management Concepts: A Review of Australian Experience. *Environmental Management*, 37(5), 589-605. doi: <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0252-1>
- Ojeda, A., Álvarez, C., Ramos, M., y Soto, F. (2017). Determinants of domestic water consumption in Hermosillo, Sonora, Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1901-1910.
- Rodríguez-Tapia, L., Morales-Novelo, J., y Revollo-Fernández, D. (2019). Impacto de los subsidios al agua en los hogares pobres de la Ciudad de México. *Gestión y política pública*, 28(1), 39-67.
- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2014). *Portal de transparencia, solicitud de información pública 0324000022614. Total de tomas instaladas para uso doméstico, total de tomas instaladas con medidor y nombre de colonias*. Obtenido de <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>

- SACMEX [Sistema de Aguas de la Ciudad de México]. (2019a). *Librería Virtual. Diagnósticos, logros y desafíos SACMEX 2018*. Recuperado el 12 de 05 de 2019, de <http://data.sacmex.cdmx.gob.mx/aplicaciones/libreria/biblioteca/libros/2018/diagnostico-logros-y-desafios-2018.pdf>
- SEDUVI [Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda]. (2015). *Portal de transparencia, solicitud de información pública 0105000279114. Colonias de la Ciudad de México*. Retrieved from <https://www.plataformadetransparencia.org.mx/web/guest/inicio>
- Shandas, V., y 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.
- Turner, V., e Ibes, D. (2011). The impact of homeowners associations on residential water demand management in Phoenix, Arizona. *Urban Geography*, 32(8), 1167-1188.
- Wentz, E., y Gober, P. (2007). Determinants of Small-Area Water Consumption for the City of Phoenix, Arizona. *Water Resources Management*, 21, 1849-1863.

Tabla 8 Estudios sobre demanda, uso y consumo de agua en diferentes ciudades del mundo

Referencia	Término	Zona de estudio	Objetivo	Variable dependiente	Variabes independientes	Técnica espacial
Downs <i>et al.</i> , 2000	Demanda de agua	Ciudad de México, México	Se proyectó la demanda de agua hacia el año 2015 para los sectores doméstico, agrícola, industrial, comercial y de generación de energía, usando un modelo probabilístico.	Coefficientes <i>pér capita</i> de uso de agua, retomados de otros estudios.	Crecimiento poblacional (estimado de forma probabilística), total de establecimientos comerciales e industriales, estimación de área irrigable.	No
Arbués y Villanúa, 2006	Demanda de agua	Zaragoza, España	Explorar el rol presente de las estrategias tarifarias de los usuarios domésticos de agua en Zaragoza.	Consumo estacional medido. Periodo 1996-1998.	Precio pagado según tarifa oficial; temperatura diaria máxima; nivel educativo y edad; tamaño del hogar; presencia de calentador de agua.	No
Domene y Saurí, 2006	Consumo de agua	Barcelona, España	Examinar la influencia sobre el comportamiento de consumo del agua, de factores como tipo de vivienda (viviendas unifamiliares, departamentos con jardines compartidos y albercas, y departamentos sin estas instalaciones) y tamaño del hogar.	Promedio anual de consumo por hogar, consumo de agua veraniego, consumo de agua invernal, agua per capita anual promedio, agua per capita verano, agua per capita invierno. Año 2004.	Tamaño del hogar, área del terreno, conexiones de agua interiores, requerimientos promedio del jardín, tamaño del jardín, presencia de albercas, ingreso neto, proporción de gasto en	No

					agua, índice de conducta de consumo.	
Babel <i>et al.</i> , 2007	Demanda de agua	Katmandú, Nepal	Desarrollar un modelo de coeficientes múltiples para la predicción y gestión de la demanda doméstica de agua considerando factores socio-económicos, climáticos y de políticas.	Uso doméstico anual (m ³ /día). Periodo 1988-2001.	Tarifa de agua; población; PIB per cápita; proporción de población universitaria; total de hogares; tamaño del hogar promedio; temperatura anual promedio; precipitación anual promedio.	No
Wentz y Gober, 2007	Consumo de agua	Phoenix, EUA	Examinar los efectos de las características de los hogares y de las viviendas sobre el consumo de agua, a nivel de unidad censal.	Consumo promedio de agua de las viviendas unifamiliares. Año 2000.	Porcentaje de albercas, tamaño promedio del lote, porcentaje de vegetación mesica, tamaño promedio del hogar.	Sí
Chang <i>et al.</i> , 2010	Consumo de agua	Portland, EUA	Explicar la variación del consumo doméstico de agua de las viviendas unifamiliares en bloque, en términos de la densidad y de características socio-económicas y físicas dentro de unidades censales.	Consumo anual de agua. Año 2005.	Tamaño de los edificios, densidad, años de construcción de los edificios.	Sí

House-Peters <i>et al.</i> , 2010	Consumo de agua	Hillsboro, EUA	Analizar la relación entre determinantes característicos del consumo de agua en las viviendas unifamiliares, como la sensibilidad al clima, incluyendo la sequía y la variación estacional interanual.	Uso base de agua 2004, uso estacional de agua 2004, uso base de agua 2006, uso estacional de agua 2006, sensibilidad climática interanual 2004, sensibilidad climática interanual 2006.	Ingreso, población con educación, tamaño del hogar, edad de la población, tamaño del predio, edad de las construcciones, tamaño del predio, tamaño de la edificación, valor catastral.	Sí
Shandas y Parandvash, 2010	Consumo de agua	Portland, EUA	Cuantificar la influencia de la zonificación y las características estructurales de los desarrollos urbanos sobre el consumo de agua.	Consumo anual de agua. Periodo 2002-2005.	Área de viviendas unifamiliares, área de viviendas multifamiliares, área comercial-industrial, área vacante, área total construida, total de desarrollos de viviendas unifamiliares, ingreso mediano, total de personas con educación universitaria.	No
Turner e Ibes, 2011	Demanda de agua	Phoenix, EUA	Comparar el consumo de agua de las viviendas unifamiliares que se encuentran dentro de los HOAs (comunidades de vecinos asociados) y fuera de ellos.	Demanda de agua del hogar. Año 2006.	Porcentaje de hispanos, porcentaje de personas blancas, ingreso mediano, tamaño del hogar, edad promedio de la construcción, tamaño de lote, porcentaje de albercas, promedio de NDVI, cobertura de HOAs.	No

De-Maria-André y Carvalho, 2014	Demanda de agua	Fortaleza, Brasil	Analizar la demanda de agua utilizando técnicas econométricas espaciales de forma exploratoria.	Consumo de agua mensual. Febrero, 2007.	Precio efectivo, precio promedio, precio marginal, diferencia, ingreso familiar, tipo de propiedad, residentes masculinos, residentes femeninos, baños, jardines.	Sí
Kontokosta y Jain, 2015	Uso de agua	Nueva York, EUA	Proveer comprensión en los drivers que guían el consumo de agua en los edificios multifamiliares, para establecer niveles y medidas para el control del consumo de agua. Analizar los patrones espaciales y la identificación del tipo de construcciones en relación con el uso de agua. Examinar las diferencias de los patrones de consumo e intensidad según la situación socio-económica de los hogares según su ingreso y demografía.	Intensidad de uso del agua. Año 2012.	Tamaño de lote, número de pisos, edad de la construcción, presencia de alberca, porcentaje de espacio no residencial, valor por área, total de unidades residenciales en el edificio, propiedad comunitaria, número de ocupantes, lavadoras de platos por vivienda, número de cuartos por vivienda, intensidad de uso energético, subsidios por vivienda, ingreso mediano, proporción de mujeres, personas graduadas, personas negras, hispánicas y arrendatarios.	Sí

Ashoori, Dzombak, y Small, 2016	Demanda de agua	Los Ángeles, EUA	Modelar la demanda de agua por categoría de uso del agua, definida por el organismo operador, e identificar los factores dominantes que impactan cada una.	Demanda doméstica mensual; demanda doméstica anual; demanda anual de viviendas unifamiliares; demanda anual de viviendas multifamiliares; demanda anual comercial; demanda anual industrial; demanda anual gubernamental. Período 1970-2014.	Precipitación mensual; precipitación anual; temperatura mensual promedio; temperatura anual promedio; esquema tarifario 1; esquema tarifario 2; población mensual estimada; población anual estimada; niveles de conservación; ingreso mediano anual.	No
Chang <i>et al.</i> , 2017	Uso de agua	Portland, Salt Lake City, Phoenix, Austin, EUA	Se realizó una comparación multi-ciudad tomando datos espacialmente explícitos de agua, socio-económicos y biofísicos.	Uso del agua mensual en las viviendas unifamiliares. Año 2011.	Temperatura máxima mensual, precipitación mensual, tamaño de lote, edad de construcción del edificio, superficie impermeable.	Sí
Ghavidelfar y Shamseldin, 2017	Demanda de agua/ consumo de agua	Auckland, Nueva Zelanda	Integrar datos de consumo de agua, uso de suelo e información demográfica desde un enfoque multiescalar que contempla viviendas y unidades censales.	Datos mensuales de consumo de agua. Período 2008-2014.	Valor catastral de vivienda, tamaño del predio, viviendas con alberca, precio por volumen de agua residual, precio anual fijo, temperatura promedio, precipitación anual total, ingreso mediano del hogar, tamaño del hogar,	No

					número de cuartos, densidad de viviendas unifamiliares, áreas de bajos ingresos, áreas de altos ingresos.	
Ojeda <i>et al.</i> , 2017	Consumo de agua	Hermosillo, México	Estudiar las variables explicativas en un modelo que refleje el consumo de agua en los hogares de la ciudad de Hermosillo, en una situación de suministro de agua continuo.	Consumo mensual per capita. Año 2010.	Número de baños, tarifa baja, servicio medido, agua embotellada semanal, habitantes.	No

Nota complementaria 2. Sobre los ajustes de los modelos estadísticos presentados en los capítulos 1 y 2

Resumen

En la presente sección se exponen algunos elementos sobre los ajustes de los análisis estadísticos presentados en el “Capítulo 1. Análisis socio-espacial de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México” y en el “Capítulo 2. Análisis Espacial y Estimación de la Demanda Urbana de Agua en la Ciudad de México”. Se pretende aportar mayor comprensión y certeza sobre la utilidad de los resultados de dichos análisis, para explicar el componente medido de la demanda urbana de agua. Al final de esta sección aparece el “Mapa de referencia” para consultar los nombres de las alcaldías que se exponen en los capítulos 3 y 4.

Precisiones sobre los análisis del “Capítulo 1. Análisis socio-espacial de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México”.

La Tabla 1 muestra las estadísticas descriptivas del análisis que se realizó para explicar el uso doméstico de agua a nivel colonia, para el año 2010. En la Tabla 3 del Capítulo 1, esta información se presentó en forma logarítmica. En este caso, se muestran los datos de manera nominal para brindar más información sobre el comportamiento que de las variables. Durante el desarrollo del Capítulo 1, se realizó la conversión logarítmica para normalizar las variables y estimar sus elasticidades.

Tabla 1 Estadísticas descriptivas 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)	18.27	3,562,276.46	232,783.48	330,941.79
Usuarios domésticos con medidor (%)	0.05	100.00	70.06	24.49
Total de viviendas con toma interna de agua (viviendas)	11.45	23,270.65	1,612.89	2,093.99

Índice de Desarrollo Social promedio	0.53	1.00	0.82	0.10
Suministro intermitente (0 o 1)	0.00	1.00	0.10	0.29
Tamaño del hogar promedio (habitantes por vivienda)	2.14	5.37	3.65	0.45
Densidad de vivienda (viviendas por ha)	0.22	136.67	42.40	23.03

Como parte de los procedimientos para estimar el modelo de explicación del uso doméstico de agua, se realizó una matriz de correlaciones entre las variables que se contemplaron (dependiente e independientes). En el Capítulo 1, se encuentran en la Figura 3 en donde no se aprecian las magnitudes obtenidas de los coeficientes de correlación. En este apartado, se muestran en la Tabla 2, donde también se observan los signos que marcan las relaciones entre las variables utilizadas.

Tabla 2 Matriz de correlaciones entre todas las variables bajo análisis.

	Demanda doméstica anual	Usuarios con medidor (%)	Viviendas con toma interior	Tamaño del hogar	Índice de Desarrollo Social	Densidad de vivienda	Suministro intermitente
Demanda doméstica anual	1						
Usuarios con medidor (%)	0.58	1					
Viviendas con toma interior	0.66	-0.06	1				
Tamaño del hogar	-0.32	-0.08	-0.20	1			
Índice de Desarrollo Social	0.44	0.31	0.12	-0.71	1		
Densidad de vivienda	0.22	0.03	0.39	0.01	-0.10	1	
Suministro intermitente	-0.25	-0.36	0.09	0.21	-0.33	0.01	1

Entre los análisis que se realizaron, en el Capítulo 1 en la Figura 4, están los resultados del cálculo de los valores de la I de Moran para las distribuciones espaciales de la demanda

doméstica de agua anual, los usuarios domésticos con medidor, el total de viviendas con toma interna de agua, el Índice de Desarrollo Social, el suministro intermitente y la densidad de vivienda. En la Tabla 3 de este apartado, se exponen los valores obtenidos acompañados por los valores de p, que fueron calculados con aleatorizaciones de 999 permutaciones. En todos los casos, estos valores fueron menores a 0.05, lo que indica significatividad estadística en los patrones espaciales analizados.

Tabla 3 Valores para la I de Moran y significatividad de las variables estudiadas en el Capítulo 1.

Variable	Valor para la I de Moran	Valor de p
A) Demanda doméstica de agua anual	0.38	0.001
B) Usuarios domésticos con medidor	0.49	0.001
C) Total de viviendas con toma interna de agua	0.25	0.001
D) Índice de Desarrollo Social promedio	0.65	0.001
E) Suministro intermitente	0.57	0.001
F) Densidad de vivienda	0.38	0.001

Los resultados obtenidos mediante la estimación del modelo de regresión lineal múltiple (OLS) para explicar la demanda doméstica de agua, aparecen en la Tabla 4 del Capítulo 1. En la Tabla 4 del presente apartado, se añade el factor de inflación de la varianza para cada uno de los coeficientes beta estimados. Los valores obtenidos fueron menores a cuatro, lo que muestra que no existe multicolinealidad entre las variables que se seleccionaron para explicar el uso doméstico a nivel colonia. Esto se confirma con las matrices de correlación de la Figura 3 del Capítulo 1 y de la Tabla 2 de esta sección. El modelo estimado es global y estacionario, además de que sus residuales presentaron autocorrelación espacial de 0.135 medida con la I de Moran, y el valor de p asociado a esta distribución espacial fue de 0.001 calculado con una aleatorización de 999 permutaciones.

Tabla 4 Coeficientes beta, valores t, valores de p y factor de inflación de la varianza de las variables del modelo de regresión lineal múltiple OLS que explica la demanda doméstica de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.

Variable	Coeficiente beta	Valor de t	Valor de p	Factor de inflación de la varianza
Usuarios domésticos con medidor (%)	0.98	50.345	< 2.00E-16	1.22
Total de viviendas con toma interna de agua (viviendas)	1.00	63.063	< 2.00E-16	1.26
Índice de Desarrollo Social promedio	1.99	13.992	< 2.00E-16	1.26
Densidad de vivienda (viviendas por ha)	-0.11	-4.639	3.85E-06	1.23
Suministro intermitente (0 o 1)	-0.37	-6.199	7.57E-10	1.24

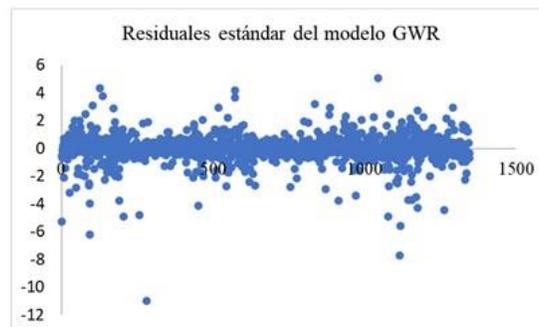
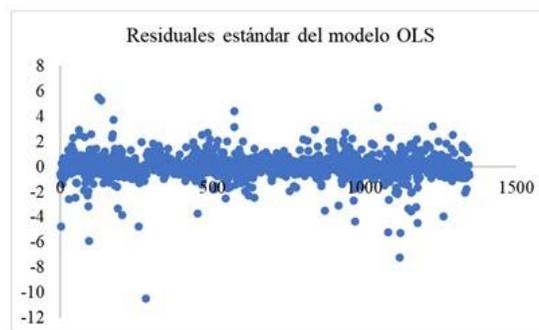
El análisis de regresión GWR generó estadísticos locales para cada una de las variables seleccionadas, como se muestra en la Tabla 5 del Capítulo 1 y también en los mapas que conforman la Figura 5 del Capítulo 1. En adición a esos resultados, se exponen los resultados del análisis de variabilidad geográfica (DIFF) calculados con el software GWR 4.0 (Tabla 5 a continuación). Cuando los resultados del criterio DIFF resultan positivos, sugieren que no hay variabilidad geográfica y que es mejor asumir los valores globales. En este caso, tanto el Índice de Desarrollo Social y el suministro intermitente de las colonias tuvieron valores de 0.45 y 2.04, respectivamente. Como elemento final, la Figura 1 del presente apartado muestra la distribución de los residuales estándar para ambos modelos (OLS y GWR). Se observan algunos valores que resultaron atípicos, pero en general, se ubican alrededor del cero sin mostrar una tendencia aparente; lo que puede sugerir que no hay presencia de heterocedasticidad.

Tabla 5 Variabilidad Geográfica de los coeficientes locales estimados a partir del modelo de regresión GWR que explica la demanda doméstica de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.

Variable	F	DOF for F test		DIFF of Criterion
Intercept	87.10	5.75	1302.02	-425.52
Suministro intermitente	1.99	5.61	1302.02	0.45

Usuarios domésticos con medidor	30.74	6.84	1302.02	-187.03
Total de viviendas con toma interna de agua	36.62	6.57	1302.02	-214.17
Densidad de vivienda	37.53	6.10	1302.02	-204.86
Índice de Desarrollo Social	1.73	5.80	1302.02	2.04

Figura 1 Residuales estándar, obtenidos a partir de la estimación de los modelos de regresión OLS y GWR para explicar la demanda doméstica de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.



Precisiones sobre los análisis del “Capítulo 2. Análisis Espacial y Estimación de la Demanda Urbana de Agua en la Ciudad de México”

En el Capítulo 2 se especificaron tres modelos de regresión lineal múltiple para explicar los usos doméstico, mixto y no doméstico del agua a partir de variables independientes que caracterizan el ambiente urbano construido, el acceso al agua y la micromedición. Similar al Capítulo 1, el modelo se estimó con una forma log-log para todas las variables. En la sección del Anexo del Capítulo 2, se presentaron las estadísticas descriptivas de las variables utilizadas en forma logarítmica. En la Tabla 6 de este apartado las variables aparecen en forma nominal.

Tabla 6 Estadísticas descriptivas de las variables utilizadas para estimar los usos doméstico, mixto y no doméstico de agua en las colonias de la Ciudad de México, año 2010.

Variable	Mínimo	Promedio	Máximo	Desviación Estándar
Uso Doméstico (m ³ /año)	18.27	233,610.88	3,562,276.46	331,446.55
Uso No Doméstico (m ³ /año)	7.89	59,227.37	3,833,796.04	166,629.97
Uso Mixto (m ³ /año)	6.10	31,662.08	1,590,326.11	68,611.27
Micromedición Uso Doméstico (%)	0.05	70.16	100.00	24.43
Micromedición Uso No Doméstico (%)	2.81	73.31	100.00	20.24
Micromedición Uso Mixto (%)	0.25	84.70	100.00	23.51
Conjuntos habitacionales (cuenta)	-	8.97	621.00	31.53
Edificios (cuenta)	-	39.05	2,338.00	122.60
Establecimientos (cuenta)	-	42.13	4,224.00	138.83
Otros domicilios (cuenta)	-	55.03	2,821.00	120.56
Servicios (cuenta)	-	6.64	208.00	11.40
Viviendas (cuenta)	-	670.99	11,611.00	889.45
Viviendas con actividad económica (cuenta)	-	69.56	1,423.00	109.65

Densidad de predios (predios/ha)	0.06	24.49	87.42	13.74
Superficie de predios (ha)	0.02	29.50	495.43	41.91
Tandeo (0,1)	-	0.09	1.00	0.29

La Tabla 7, a continuación, muestra los factores de inflación de la varianza para los tres modelos que se utilizaron para explicar los usos doméstico, no doméstico y mixto del agua en las colonias de la Ciudad de México; que resultaron en todos los casos menores a cuatro, por lo que se descarta la multicolinealidad. En la Figura 2 de este apartado, se presentan los residuales estándar de cada uno de los modelos. En ellos se detecta una tendencia de agrupación que puede deberse a la especificación de la forma, lo cual representa una limitante para el uso del modelo.

Tabla 7 Factores de inflación de la varianza de los modelos de regresión lineal múltiple utilizados para estimar los usos doméstico, mixto y no doméstico de agua en las colonias de la Ciudad de México. Año 2010.

Variable	Uso Doméstico	Uso No Doméstico	Uso Mixto
Micromedición (MC)	1.16	1.06	1.18
Conjuntos habitacionales (CH)	1.51		
Edificios (ED)	1.76	1.77	2.05
Establecimientos (ES)		2.03	2.43
Otros domicilios (OD)			1.75
Servicios (SR)	2.42	1.61	2.34
Viviendas (VI)	1.69		2.53
Viviendas con actividad económica (VE)			2.26
Densidad de predios (DN)		1.03	
Superficie de predios (SP)	2.26		
Tandeo (TA)	1.25		1.16

Figura 2 Residuales estándar de los modelos de regresión lineal múltiple utilizados para estimar los usos doméstico, mixto y no doméstico de agua en la Ciudad de México. Año 2010.

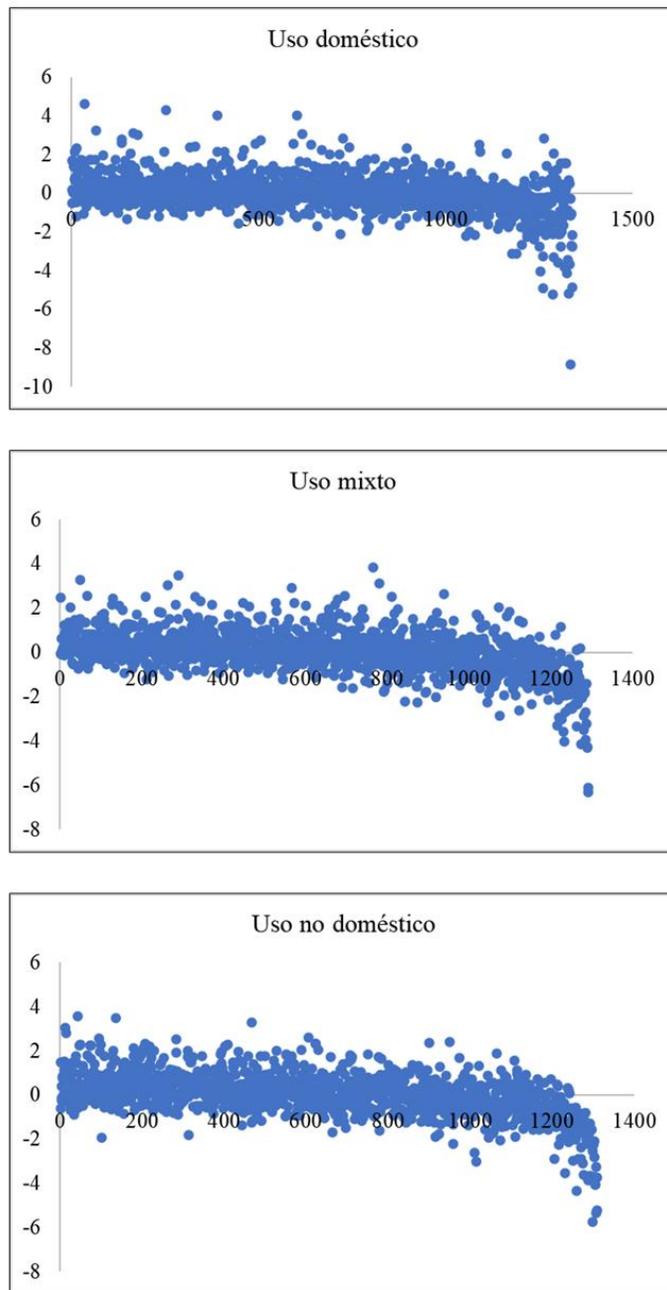
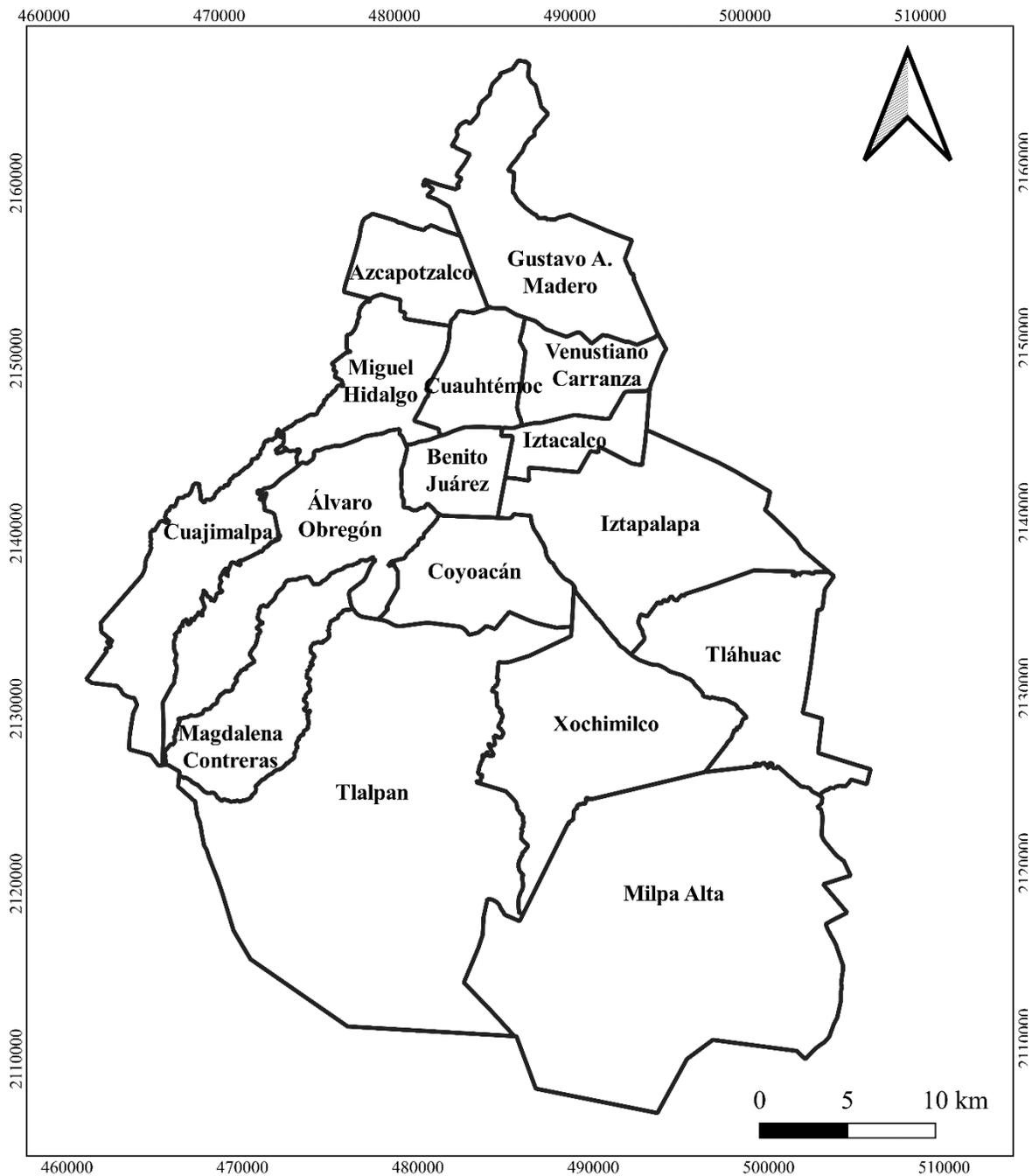


Figura 3 Mapa de referencia, para consulta de los nombres de las alcaldías de la CDMX que se mencionan en los capítulos 3 y 4.



SRC: WGS 84 UTM zona 14 N