

---

# DEMANDA HÍDRICA URBANA EN MÉXICO: MODELADO ESPACIAL CON BASE EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

CARLOS ROBERTO FONSECA ORTIZ,  
CARLOS DÍAZ-DELGADO, MARIVEL HERNÁNDEZ TÉLLEZ  
Y MARÍA VICENTA ESTELLER ALBERICH

---

## RESUMEN

*El presente trabajo propone un método que facilita el modelado de la estimación de la demanda de agua para usos urbanos con base en un sistema de información geográfica (SIG) donde el sistema de información de consumo (SIC) es inexistente o insuficiente. Este método determina una dotación de agua basada en el nivel socioeconómico de acuerdo con la clasificación de marginación urbana definida para cada una de las áreas geo-estadísticas básicas (AGEB) que proporciona el Instituto Nacional de Estadística y Geografía en México. Para el año de estudio, 2005, se efectuó una comparación entre las estimaciones de la demanda de agua realizadas por el organiz-*

*mo operador del agua en Toluca, México, y el presente método, utilizando las AGEBS. Esta comparación permite concluir que problemas como una inadecuada distribución del agua pueden ser resueltos por medio de esta propuesta, utilizando representaciones espaciales de la demanda proyectada. De esta manera, es posible diseñar estrategias en el suministro de agua potable contando con una herramienta de control para la administración y planeación del recurso hídrico. Adicionalmente, el monitoreo sobre el gasto de agua proyectado y suministrado permitirá un análisis sobre la dotación requerida por tipo de consumo y su reducción en el marco de cultura de ahorro de agua.*

En la definición de políticas públicas, el suministro de agua no ha dejado de ser un tema de controversia entre los actores dedicados al análisis de aspectos económicos, sociales, ambientales y políticos como factor a considerar antes de tomar una decisión, particularmente en lugares con una fuerte presión social, una intensa

carga ambiental y un alto crecimiento económico como es la ciudad de Toluca, México. Esta es la quinta zona metropolitana más habitada del país (INEGI, 2010) y está ubicada sobre un acuífero considerado como sobreexplotado (CONAGUA, 2009). En 2010, el 83,43% del agua extraída de este acuífero (395,76hm<sup>3</sup>/año) se destinó al uso urbano (IMTA, 2010) y, de acuerdo

con registros de extracciones (AyST, 2005; IMTA, 2010) ha representado la mayor fuente de abastecimiento de la ciudad de Toluca: desde el 72,18% en 2005 hasta el 89,1% en 2010 del total del volumen suministrado (el resto del volumen es proporcionado por trasvase de aguas superficiales). Por ello, el análisis y estimación del volumen suministrado toman una mayor relevan-

---

**PALABRAS CLAVE / Áreas Geo-Estadísticas Básicas / Demanda de Agua / México / Sistemas de Información Geográfica / Toluca / Zona Urbana /**

Recibido: 14/2/2012. Modificado: 22/01/13. Aceptado: 30/01/2013.

**Carlos Roberto Fonseca Ortiz.** Ingeniero Civil, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Maestría en Ciencias del Agua, Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEMex), México. Profesor, CIRA, México. Dirección: CIRA, Facultad de Ingeniería, UAEMex. Cerro de Coatepec. CU s/n 50110 Toluca, México. e-mail: crfonsecao@uaemex.mx

**Carlos Díaz Delgado.** Ingeniero Civil, Universidad Autónoma de Querétaro, México. Maestro en Ciencias y Doctor en Ingeniería, Université Laval, Quebec, Canadá. Profesor Investigador, CIRA-UAEMex, México. e-mail: cdi-azd@uaemex.mx

**Marivel Hernández Téllez.** Ingeniera Forestal, Universidad Autónoma Chapingo, México. Maestra y Doctora en Ciencias, Colegio de Posgraduados, México. Profesora, CIRA-UAEMex, México. e-mail: mhernandezt@uaemex.mx

**María Vicenta Esteller Alberich.** Licenciada en Ciencias Geológicas y Doctora en Geología, Universidad de Granada, España. Profesora, CIRA-UAEMex, México. e-mail: mvestellera@uaemex.mx

---

cia para evitar el despilfarro del recurso hídrico.

La gestión del agua es un proceso indispensable que condiciona la existencia misma de las ciudades y su desarrollo (Caire, 2005), por lo que la determinación de la demanda adecuada de agua puede tomar varios enfoques en función de las técnicas, herramientas e información disponibles en el territorio en estudio.

De los factores que influyen en las necesidades hídricas de una población, Jorgensen *et al.* (2009) resaltan la variabilidad climática, los incentivos económicos, las regulaciones normativas, la infraestructura de las propiedades y la cultura de los habitantes. Algunos de estos factores son utilizados en los modelos para estimar la demanda de agua para usos urbanos. Por ejemplo, los modelos de precios utilizan mecanismos de mercado para controlar la demanda, los modelos de regresión utilizan registros históricos de consumos para realizar pronósticos y existen modelos determinísticos que tratan de inferir una demanda de agua para uso urbano por medio de las características físicas y operativas de las instalaciones de los inmuebles.

Diversos estudios heurísticos (Arbués *et al.*, 2003; Dalhuisen *et al.*, 2003; Strand y Walker, 2005; Ruijs *et al.* 2008) han demostrado que la demanda de agua para uso urbano disminuye conforme la tarifa por suministrarla aumenta (elasticidades entre -0,1 y -0,4 en Centro y Sudamérica y elasticidades entre -0,20 y -0,49 en Europa) y entre mayores sean los ingresos de los habitantes, mayor es su demanda de agua (elasticidades hasta 0,42 en Sudamérica). Sin embargo, no ha sido demostrado que el conocimiento del precio marginal es el controlador del comportamiento de la demanda (Carter y Milon, 2005).

Por otro lado, los métodos de regresión, como modelos de series de tiempo y modelos de redes neuronales, han sido utilizados para pronosticar la demanda de agua en modelos de optimización (Ashu *et al.*, 2001). La predicción de demanda con estos modelos ha tenido resultados satisfactorios; sin embargo, se pueden presentar casos donde la cantidad de registros sobre consumos de agua no es suficiente para llevar a cabo estos estudios. Además, factores políticos pueden cambiar radicalmente la regulación del agua, por lo que en lugar de seguir las predicciones proporcionadas por los modelos de regresión, el consumo de agua puede reflejar una tendencia de

sentido opuesto, como lo sucedido en Alemania, donde, contrario al aumento pronosticado desde la década de 1970, el consumo de agua disminuyó 13% entre 1991 y 2004 (Schleich y Hillenbrand, 2009).

La demanda de agua para uso urbano, definida como un volumen de agua por un periodo de tiempo, es vista como un elemento complejo que depende de características físicas y socioeconómicas, estrategias de planeación urbana, infraestructura y políticas de aguas públicas. Sin embargo, cabe resaltar que establecer el suministro del agua no es más complicado que asignar una dotación a cada sector de la población. Esta dotación (concebida como un volumen diario de agua *per cápita*), adecuada o no, intenta reflejar los factores antes mencionados a través del nivel socioeconómico que representan los ingresos de los habitantes, su estilo de vida, el tamaño y la infraestructura de sus inmuebles así como las variaciones estacionales en función del clima.

La dotación de agua puede permanecer casi constante durante varios años. Por ejemplo, Panagopoulos *et al.* (2012) encontraron que en Mytilene, Grecia, la demanda aumentó 12,1% entre 2000 y 2007 debido al crecimiento del número de habitantes, mientras que la dotación tuvo una variación promedio del 2%. Por otro lado, Idowu *et al.* (2012) utilizan la misma dotación por sector para estimar la demanda de agua en los próximos 30 años en función únicamente del crecimiento demográfico. De esta manera, la dotación de agua, considerando variaciones estacionales, puede aumentar o disminuir en función de cambios en políticas de aguas públicas, tales como la implementación de tecnología ahorradora (Chen *et al.*, 2012) o programas de conservación (Clark y Finley, 2008).

En el presente trabajo se expone un método que utiliza sistemas de información geográfica (SIG) en etapas de planeación y diseño del proceso de suministro de agua. En este proceso, la proyección de los requerimientos es la base del diseño y combinado con métodos para la estimación de consumos reales, tales como los propuestos por Alcocer *et al.* (2008) y Alcocer y Tzatchkov (2009), puede evitar fallas provocadas por una sobreestimación o subestimación de dichos requerimientos.

Esta propuesta, a diferencia de paquetes informáticos comerciales (InfoWorks, 2011; DHI, 2011) que requieren de un sistema de infor-

mación de consumo (SIC), utiliza una dotación de agua reduciendo la incertidumbre en la estimación de la demanda de agua con fundamento en bases de datos geoespaciales de cobertura nacional y un sistema de información geográfica (SIG). En este caso, se utilizó Idrisi (Eastman, 2006) como software especializado en el manejo de cartografía *raster* y vectorial por sus cualidades para ensamblar y ejecutar análisis multipasos en ambientes gráficos.

## Desarrollo

La estimación de la demanda de agua para usos urbanos puede ser conceptualizada a través de los consumos domésticos y para servicios públicos urbanos como lo muestra la ecuación

$$Q_T = Q_m + Q_{SP} + Q_P \quad (1)$$

donde  $Q_T$ : gasto medio diario de demanda total ( $l \cdot s^{-1}$ ),  $Q_m$ : gasto medio diario por consumo doméstico ( $l \cdot s^{-1}$ ),  $Q_{SP}$ : gasto medio diario por servicios públicos urbanos ( $l \cdot s^{-1}$ ) y  $Q_P$ : gasto medio diario por pérdidas físicas en el sistema ( $l \cdot s^{-1}$ ).

La magnitud del consumo doméstico depende, entre otras cosas, del tamaño de la población, de las necesidades individuales en la comunidad y de los hábitos de uso del agua. Por su parte, la magnitud de la demanda por uso público urbano depende del tipo de servicio (escuelas, hospitales, áreas de recreación etc.), de la superficie cubierta por servicio (en el caso de áreas de verdes y de recreación) y del número de usuarios del mismo.

### Consumo doméstico de agua

La estimación del gasto medio diario para uso doméstico en un lugar determinado, para proyectos de diseño en México, se realiza bajo el empleo de la Ec. 2 (CONAGUA, 1994)

$$Q_{mj} = A_j \left( \frac{\delta_j \times D_j}{86400} \right) \quad (2)$$

que es una función del tamaño de la población y la dotación requerida por los habitantes considerando la influencia del clima en las necesidades hídricas de la población. Esta ecuación fue ajustada debido a que en el SIG es primordial que la demanda de agua sea una función de la superficie dada para la unidad geográfica en estudio, por ejemplo, las manzanas que conforman la estructura urbana. Para el gasto me-

TABLA I  
VALORES DE DISEÑO PARA DOTACIÓN DE AGUA  
PARA USO DOMÉSTICO

Clima	Nivel socioeconómico		
	Residencial	Medio	Popular
Cálido (>22°C)	400	230	185
Semicálido (18-22°C)	300	205	130
Templado (<18°C)	250	195	100

Fuente: CONAGUA (1994).

diario  $Q_{mj}$  ( $l \cdot s^{-1}$ ) de la unidad geográfica  $j$ , la relación entre la superficie  $A_j$  ( $m^2$ ) de la unidad geográfica  $j$  y la dotación por habitante  $D_j$  (litro/hab/día) viene dada por la densidad demográfica  $\delta_j$  (hab/ $m^2$ ). El divisor 86400 representa el número de segundos en un día, para convertir la dotación de agua diaria en  $l \cdot s^{-1}$ .

Los valores de la dotación de agua varían entre regiones y países. Mientras que países europeos como el RU o la República Checa tienen dotaciones de  $300m^3/año$  *per cápita*, en los EEUU y Canadá ese valor se aproxima a  $1500 m^3/año$  (Renzetti, 2002). En México, la dotación de agua difiere de acuerdo con histogramas y registros disponibles por cada organismo operador que suministre el recurso, siendo pocos los sitios donde se tiene una base de datos ordenada y completa. En cualquier caso, es posible utilizar valores de diseño que proporciona CONAGUA para la dotación por nivel socioeconómico y clima (Tabla I).

Por otro lado, el índice de nivel socioeconómico está basado en variables que miden el nivel social, económico y costumbres de una familia. En México este parámetro, representado por el índice de marginación urbana, mide su intensidad como un porcentaje de la población que no participa del disfrute de bienes y servicios esenciales para el desarrollo de sus capacidades básicas (CONAPO, 2005). En total, 10 indicadores conforman el índice de marginación urbana y están clasificados en cuatro áreas (Anzaldo y Prado, 2009): a) educación, que mide el porcentaje de la población con educación básica; b) salud, que mide el porcentaje de población en programas de asistencia médica; c) vivienda, que mide el porcentaje de hogares con servicios de agua y drenaje así como nivel de hacinamiento; y d) bienes, que mide el porcentaje de viviendas con electrodomésticos tales como refrigeradores. Cabe subrayar que para la obtención de indicadores explicativos del nivel socioeconómico, la CONAPO utilizó un

análisis de componentes principales.

Las unidades geográficas utilizadas para aprovechar el potencial de análisis ofrecido por un SIG fueron las manzanas urbanas georeferenciadas donde se ubican residencias o conjuntos

habitacionales que reciben el servicio de agua potable. Esta capa de información de tipo vectorial se denomina en adelante ‘polígonos de asentamiento humano’.

La suma de los productos de la densidad demográfica y el área de todas las unidades geográficas que reciben el servicio de agua potable, representa la población total, cuya estimación es posible, al nivel de detalle deseado, mediante el software de análisis de datos geoespaciales y la información de censos, ya sea proveniente de planes de desarrollo regionales o municipales, o de áreas geoes-tadísticas básicas (AGEBs) para el caso de México.

Las AGEBS son definidas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) como el área que constituye la unidad mínima de agregación a emplear en la cartografía censal cuyas características sociales, económicas y geográficas deben ser homogéneas (IRIS-SCINCE, 2007). De aquí se obtiene la capa de información de tipo vectorial denominada ‘polígonos de densidad demográfica’ que representan la cantidad de habitantes por  $m^2$  para cada polígono de asentamiento humano.

#### Consumo de agua en servicios públicos urbanos

Un estudio de demanda de agua para servicios públicos urbanos llevaría considerable tiempo y recursos humanos para estimar los requerimientos por cada uno de los servicios existentes en una ciudad de gran tamaño. Por ello, se hace necesario realizar algunas consideraciones que reflejen un consumo de agua con la información disponible. Análogo a los polígonos de asentamiento humano, es posible construir las unidades geográficas denominadas ‘polígonos de servicios públicos’. La diferencia consiste en crear una capa de información espacial por cada tipo de servicio público. En México, los servi-

cios públicos se clasifican en: salud, educación y cultura, recreación, seguridad, comunicaciones y transporte y, espacios abiertos.

Los consumos de agua para servicios públicos urbanos tienen diferentes unidades de medición. Por ejemplo, los servicios de educación se miden en litros por alumno por turno y los servicios de hospitales en litros por cama. Además se deben considerar los empleados que laboran en ese espacio. Esta información es posible obtenerla de muestreos en escuelas y hospitales sobre el número promedio de alumnos por aula y el número promedio de alumnos o pacientes por empleado, respectivamente. Sin embargo, la implementación de modelos geomáticos requiere que tanto los consumos como el número de empleados sean funciones del área correspondiente al polígono de servicio público.

Con las características del equipamiento de servicios públicos y los datos antes mencionados se estima el consumo de servicios públicos con la Ec. 3, propuesta para esta investigación:

$$Q_{SPj} = \frac{A_{PSPj}}{86400} \left[ C_{riego} (Sup_{ncons}) + \rho_{sp} (Sup_{sp})^{-1} (C_{sp} + C_{emp} (\rho_{emp})^{-1}) \right] \quad (3)$$

donde  $Q_{SPj}$ : gasto medio diario por servicio público ( $l \cdot s^{-1}$ ) de la unidad geográfica  $j$ ,  $A_{PSPj}$ : área de la unidad geográfica  $j$  de servicio público ( $m^2$ ),  $C_{riego}$ : consumo por riego ( $l \cdot m^{-2}/día$ ),  $Sup_{ncons}$ : porcentaje de la superficie sin construir (adimensional),  $\rho_{sp}$ : densidad de servicio por unidad básica de servicio (usuarios/UBS),  $Sup_{sp}$ : superficie mínima por unidad básica de servicio ( $m^2/UBS$ ),  $C_{sp}$ : consumo por tipo de servicio público (litro/usuario/día),  $C_{emp}$ : consumo por empleado (litro/empleado/día), y  $\rho_{emp}$ : densidad de servicio por empleado (usuarios/empleado). El término 86400 representa el número de segundos en un día para convertir el consumo de agua diario en  $l \cdot s^{-1}$ .

De manera análoga a la densidad demográfica para consumos domésticos de agua, la relación entre las características de infraestructura y operación de los servicios públicos urbanos y la superficie de sus polígonos está dada por las variables densidad de servicio ( $\rho_{sp}$ ) y la superficie mínima de construcción ( $Sup_{sp}$ ). Ambas variables dependen de las unidades básicas de servicio (UBS), que son los elementos

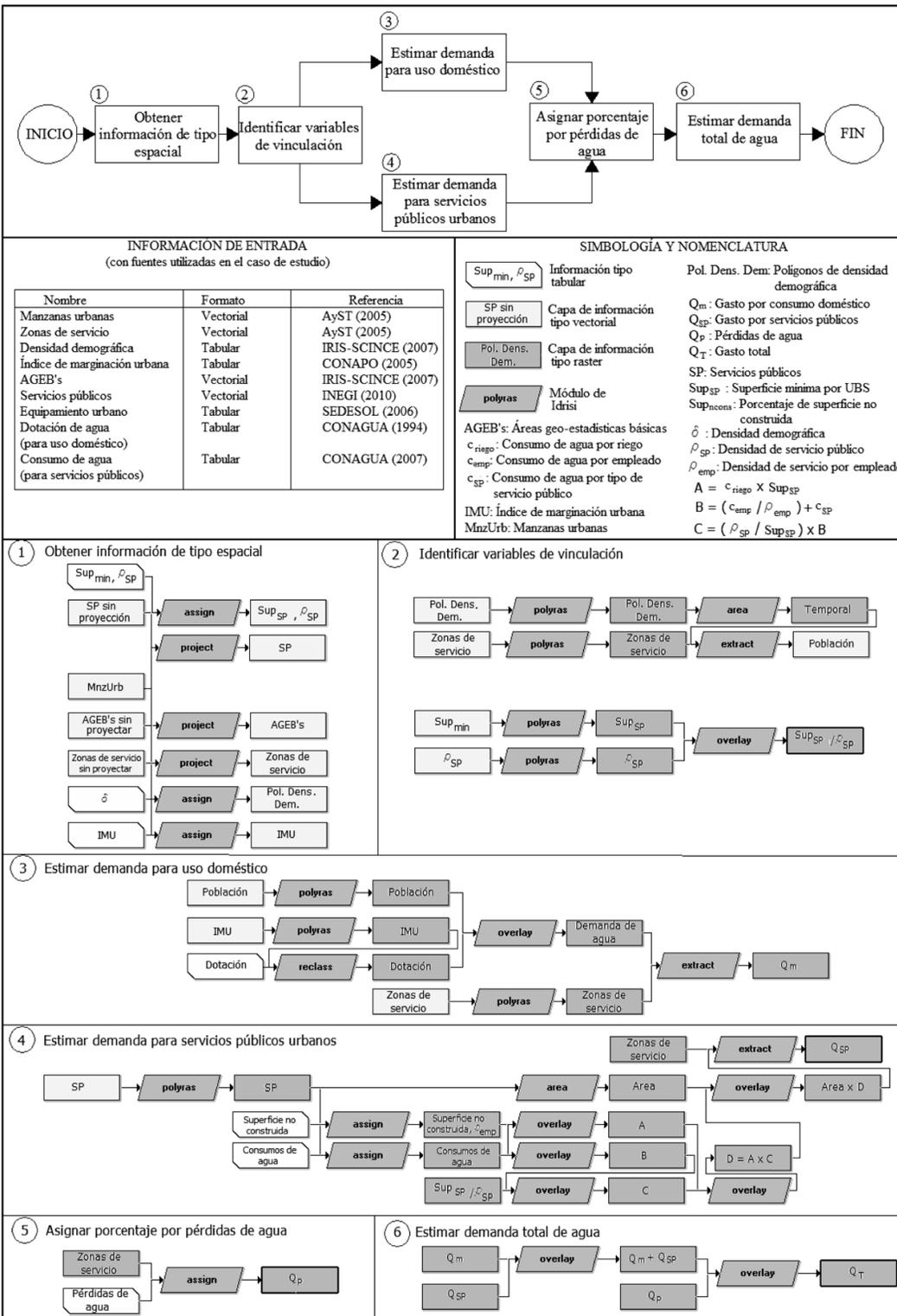


Figura 1. Diagrama para estimar la demanda de agua para usos urbanos con sistemas de información geográfica.

primarios necesarios para ofrecer el servicio público urbano. En este documento, las aulas y camas representan las UBS de educación y de salud, respectivamente.

En los servicios públicos urbanos de tipo área verde, como

parques y jardines, se puede considerar el total de la superficie como no construida ( $Sup_{ncons} = 1$ ) y los valores de densidad de servicio y por empleado son iguales a cero ( $\rho_{sp} = \rho_{emp} = 0$ ). La densidad de servicio por unidad básica para hospitales puede ser considerada

como 1 paciente/cama. En consecuencia, se desarrolló en Idrisi un modelo geomático para estimar las áreas de tres tipos de servicios públicos: de salud, de educación y de áreas verdes.

### Implementación geomática

Las Ecs. 1, 2 y 3 descritas arriba son llevadas a un ambiente de sistemas de información geográfica por medio de la Figura 1, donde es posible observar la simbología utilizada en los macromodelos de Idrisi (Eastman, 2006):

1. *Obtener información de tipo espacial.* Las capas de información que proporcionan la localización y la distribución de las entidades geográficas (manzanas urbanas, AGEBs, zonas de servicio, etc.) pueden tener un formato vectorial y deben tener necesariamente el mismo sistema de referencia (longitud/latitud o UTM, entre otros). Para ello, el módulo *project* realiza la proyección entre diferentes sistemas de referencia. Además, a partir de los datos tabulares asociados a cada entidad geográfica (como el IMU o la superficie mínima de construcción), se pueden construir capas de información de tipo vectorial con el módulo *assign*.

2. *Identificar variables de vinculación.* Las variables de vinculación son aquellas que conservan la capacidad de relacionar la superficie de las entidades geográficas con las variables complementarias para la estimación de la demanda de agua. En el caso del uso doméstico de agua, los polígonos de densidad demográfica proporcionan este vínculo y estiman, a través de una superposición con la capa de las zonas de suministro, la población en las entidades geográficas. En el caso de los servicios públicos, las variables de vinculación son la densidad de servicio público y la superficie mínima por unidad básica de servicio. Para ello, los módulos *po-*

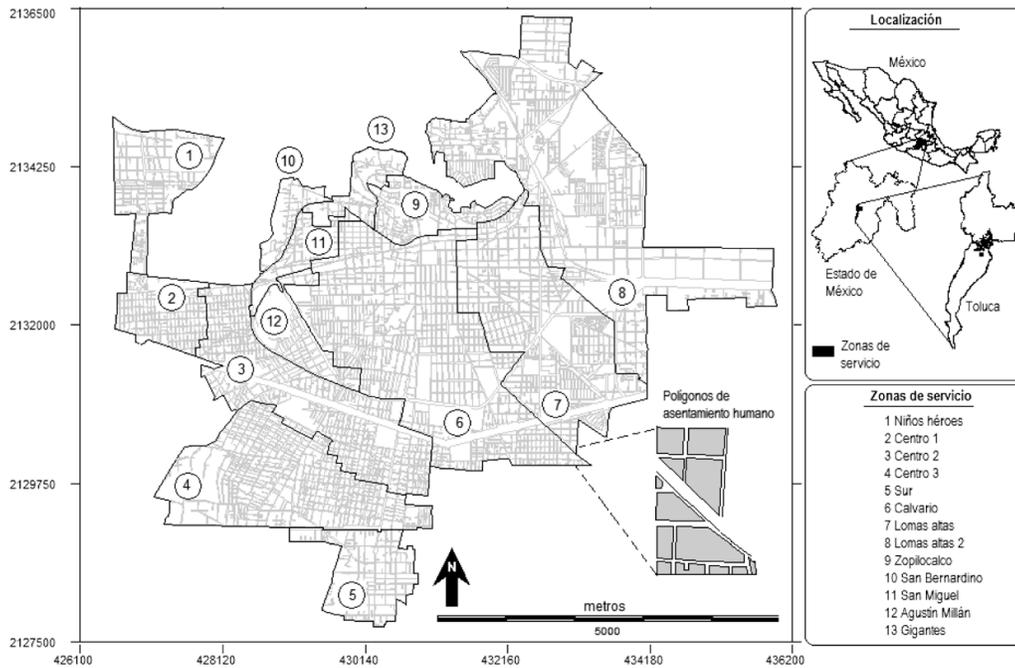


Figura 2. Zonas de servicio de agua en el área urbana de la ciudad de Toluca. Elaboración propia con información de Agua y Saneamiento de Toluca (AyST, 2005).

*lyras*, *area* y *extract* tienen las funciones respectivas de transformar las capas de tipo vectorial a un tipo *raster*, estimar la superficie de las entidades geográficas y sustraer la información de una capa contenida en los límites de otra. Por otra parte, el módulo *overlay* tiene la capacidad de realizar operaciones algebraicas en cada pixel de dos capas de información *raster*.

3. *Estimar la demanda para uso doméstico*. El módulo *reclass* permite asignar un valor de dotación a cada nivel socioeconómico contenido en su respectiva capa de información. Posteriormente, se multiplica (con el módulo *overlay*) esta capa con la obtenida para la población. El módulo *extract* sustrae el volumen total de agua demandada para cada zona de servicio.

4. *Estimar la demanda para servicios públicos urbanos*. Primero se construyen las capas de información de las variables de consumo de agua ( $C_{riego}$ ,  $C_{emp}$  y  $C_{sp}$ ), así como el porcentaje de la superficie no construida ( $Sup_{n-cons}$ ). Posteriormente, por medio del módulo *overlay*, se obtiene de manera sistemática cada término de la Ec. 3 y, con el módulo *extract* y de

manera análoga al consumo doméstico, se estima la demanda de agua por servicios públicos para cada zona de servicio.

5. *Asignar porcentaje por pérdidas de agua*. Tal como se hizo con el resto de las variables de tipo tabular, se construye la capa de información de tipo vectorial sobre las pérdidas de agua.

6. *Estimar demanda total*. Finalmente, se suman por medio del módulo *overlay* las capas correspondientes a las

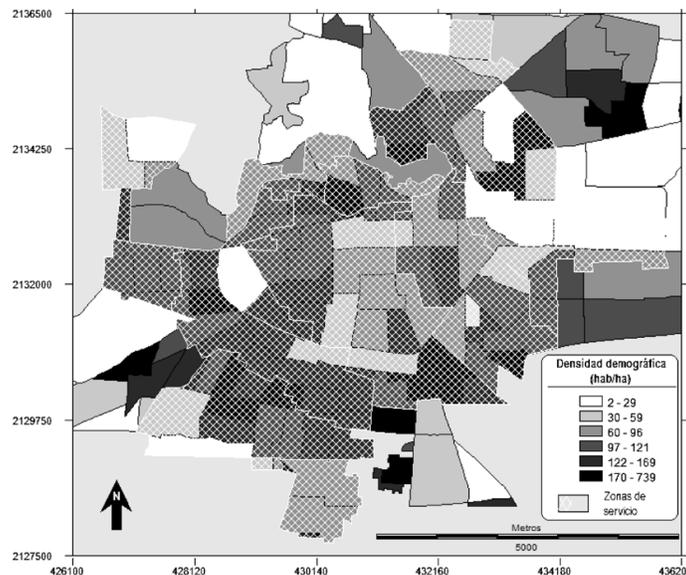


Figura 3. Densidad demográfica por AGEBS en la ciudad de Toluca. Elaboración propia sobre Áreas Geo-Estadísticas Básicas (IRIS-SCINCE, 2007).

demandas de agua y se multiplica por la capa del porcentaje de pérdidas de agua para cumplir con los términos de la Ec. 1.

### Caso de estudio

El método propuesto ha sido aplicado para el año 2005 a la ciudad de Toluca, México, territorio que ha experimentado grandes cambios en su estructura urbana y donde el sistema de distribución de agua no ha sido la excepción. En esta zona, la explosión demográfica ha provocado un crecimiento desorganizado de la red de abastecimiento de agua, dificultando un diagnóstico adecuado para evitar pérdidas de líquido en el sistema.

En las últimas dos décadas una solución adoptada en varias ciudades mexicanas ha sido sectorizar la red en subredes separadas con pocas

o, en el mejor de los casos, con una sola alimentación (Tzatchkov *et al.*, 2008). En el presente estudio se definieron las ‘zonas de servicio’ como los espacios físicos y conjunto de usuarios que son alimentados por la misma fuente de abastecimiento. El objetivo de la determinación de las zonas de servicio es tener definida el área de influencia de cada fuente y facilitar el monitoreo de la red de forma ordenada. En la Figura 2 se muestra la ubicación de las 13 zonas de servicio de la ciudad de Toluca determinadas por el organismo operador del agua (AyST, 2005), las cuales están representadas por conjuntos de polígonos de asentamiento humano.

Con respecto al consumo doméstico de agua, la población en cada zona de servicio se estimó a partir de la información proveniente del plan de desarrollo municipal (Ayuntamiento de Toluca, 2003), así como de la información censal de las AGEBS (IRIS-SCINCE, 2007). Los valores de la dotación de agua se obtuvieron de la Tabla I debido a la falta de información sobre mediciones suficientes de volúmenes suministrados en las redes de abastecimiento.

Con relación al consumo de agua por servicios pú-

TABLA II  
ESTIMACIÓN DE NÚMERO DE HABITANTES CON SIG Y EL REPORTADO POR EL ORGANISMO OPERADOR

	Reporte de organismo operador			SIG		Plan de Desarrollo Municipal			Áreas Geo-Estadísticas Básicas		
	A (ha)	$\delta$ (hab/ha)	P (hab)	A (ha)	$\Delta_{SUP}$ (%)	$\delta$ (hab/ha)	P (hab)	$\Delta_{POB}$ (%)	$\delta$ (hab/ha)	P (hab)	$\Delta_{POB}$ (%)
Total	3.176,06		497.197	2.701,0			429.265			260.782	
Promedio	244,31	141	34.447	207,8	17,7	153	33.020	9,8	99	20.060	43,6
Desv. est.	216,18	0,00	30.480	193,8	14,9	39,44	29.895	34,1	28,6	18.211	15,1

A: área,  $\delta$ : densidad demográfica, P: población,  $\Delta_{SUP}$ : variación respecto a la superficie,  $\Delta_{POB}$ : variación respecto a la población. Elaboración propia con datos de Agua y Saneamiento de Toluca (AyST, 2005).

blicos urbanos, los valores correspondientes a las características de equipamiento urbano (porcentaje de área construida, densidad de servicio y superficie mínima por unidad básica de servicio UBS) se obtuvieron de los lineamientos marcados por SEDESOL (2006). Así mismo, los valores de dotación de agua por servicio público están marcados por CONAGUA (2007).

## Resultados

La demanda total estimada para la ciudad de Toluca por medio del presente método está compuesta por: 1) el consumo doméstico, 2) el consumo de servicios públicos urbanos (hospitales, escuelas y áreas verdes) y 3) las pérdidas de agua atribuidas a las fugas en el sistema de distribución.

En el 2005, en todo el municipio de Toluca se identificaron 156 AGEBS clasificadas como urbanas (IRIS-SCINCE, 2007; Figura 3), cuya densidad demográfica promedio fue de 106 hab/ha con una desviación estándar de 93 hab/ha. Pero para la estimación de la población en las 13 zonas de servicio que son suministradas por el organismo operador de Toluca, se consideró un total de 90 AGEBS. El resto de las AGEBS cuentan con proveedores locales e independientes para su abastecimiento.

La estimación de la población se llevó a cabo por medio de la superposición de la imagen de densidades demográficas sobre los polígonos de asentamiento humano y se estimó la superficie de las AGEBS que corresponden a cada zona de servicio. La suma de los productos de la superficie de cada AGEB por su densidad demográfica da como resultado la población total para cada zona de servicio. Además, cabe señalar que, de

manera análoga, se utilizó la información sobre densidad demográfica que proviene del Plan de Desarrollo Municipal (PDM) de Toluca (Ayuntamiento de Toluca, 2003) para comparar los resultados con los obtenidos desde las AGEBS y los reportados por el organismo operador de agua.

En la Tabla II se muestran las variaciones porcentuales entre: a) las superficies correspondientes a las zonas de servicio estimadas por medio del SIG y las reportadas por el organismo operador, y b) la población estimada con valores de densidad demográfica provenientes tanto del PDM como de las AGEBS. En primer lugar, la diferencia de la variación con respecto a la superficie ( $\Delta_{sup} = 17,7\%$ ) está adjudicada a la discriminación de la superficie abarcada por calles y avenidas en el SIG, para evitar una sobreestimación de la población. Y en segundo lugar, mientras que en reportes del organismo operador se consideran valores constantes de la densidad demográfica para toda la localidad (reflejado en una des-

viación estándar igual a cero), el proceso realizado por SIG obtiene una desviación estándar de casi 29 habitantes/ha en el caso de utilizar información proveniente de las AGEBS. Cabe resaltar que los valores de densidad demográfica obtenidos del PDM son aproximaciones asociadas al nivel socioeconómico (Ayuntamiento de Toluca, 2003) mientras que los obtenidos de las AGEBS son estimaciones a partir de censos y conteos de población (IRIS-SCINCE, 2007).

Para la asignación de la dotación ( $D_i$ ) de la Ec. 2 se requirió, además del nivel socioeconómico, la clasificación del clima de la región. De acuerdo con los parámetros establecidos por la Comisión Nacional del Agua, se clasificó el clima en función únicamente de la temperatura media anual (CONAGUA, 1994). Para las zonas de servicio en estudio se utilizó el módulo de Idrisi denominado *extract* con información de la base de datos climatológicos a nivel mundial WorldClim (2006). La temperatura media anual obtenida fue de 13,38°C en un intervalo entre 12,4°C en las partes suroeste y noroeste de la localidad y 13,96°C en el este de la ciudad. En cualquier caso las temperaturas se encuentran por debajo de los 18°C, considerándose un clima templado en todas las zonas de servicio, lo que permite definir un solo clima en términos de dotación de agua. De este modo, la dotación dependió únicamente del nivel socioeconómico.

En la determinación del nivel socioeconómico de un polígono de asentamiento humano (Figura 4) se consideraron: a) el grado de marginación urbana (CONAPO, 2005) en el caso de utilizar información de las AGEBS, y b) una clasificación en función de la densi-

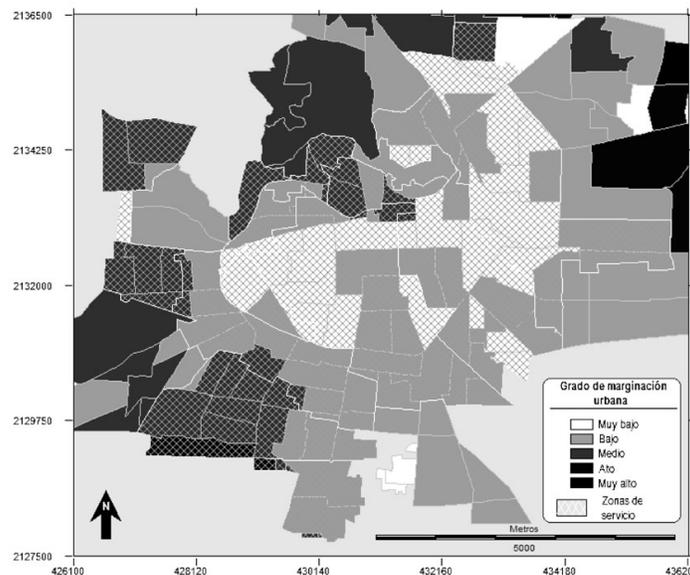


Figura 4. Grado de marginación urbana de las AGEBS urbanas del municipio de Toluca para el año 2005. Elaboración propia sobre grados de marginación urbana (CONAPO, 2005).

TABLA III  
DEMANDA DE AGUA POR ZONA DE SERVICIO EN EL AÑO 2005

ZS	Demanda estimada (l·s <sup>-1</sup> )				DT (l·s <sup>-1</sup> )	DR (l·s <sup>-1</sup> )	$\Delta_{\text{dmd}}$
	PDM	AGEBs	SP	Prd			
1	30,17	15,82	0,77	4,98	21,56	61,52	-65,0%
2	27,08	20,83	0,00	6,25	27,08	60,86	-55,5%
3	90,92	77,38	187,10	79,34	34382	159,09	116,1%
4	142,64	72,01	0,00	21,60	93,61	130,03	-28,0%
5	68,99	25,33	0,00	7,60	32,92	108,5	-69,7%
6	168,29	137,70	97,67	70,61	305,98	344,19	-11,1%
7	134,7	80,28	89,85	51,04	221,16	209,19	5,7%
8	190,77	125,71	17,71	43,03	186,46	292,14	-36,2%
9	31,76	25,00	0,72	7,72	33,44	52,22	-36,0%
10	9,91	5,88	0,00	1,76	7,64	22,16	-65,5%
11	13,83	11,56	3,74	4,59	19,89	28,55	-30,3%
12	14,51	14,79	21,48	10,88	47,14	43,64	8,0%
13	18,01	12,93	77,56	27,15	117,63	32,45	262,5%
Total	941,58	625,22	496,58	336,54	1458,35	1544,54	-5,6%
Promedio	72,43	48,09	38,2	25,89	112,18	118,81	0,43%
Desv. est.	65,52	45,48	58,06	26,7	115,69	105,09	0,93

ZS: zona de servicio, PDM: consumo doméstico según plan de desarrollo municipal, AGEB: consumo doméstico según Areas Geo-Estadísticas Básicas, SP: consumo de agua de servicios públicos, Prd: pérdidas, DT: demanda total según AGEB's, DR: demanda reportada,  $\Delta_{\text{dmd}}$ : variación en demanda.

dad demográfica, donde valores <11 viviendas/ha se consideran como nivel residencial, valores entre 11 y 50 viviendas/ha como nivel medio y valores >51 viviendas/ha como nivel popular en el caso de utilizar la información del PDM (Ayuntamiento de Toluca, 2003).

La clasificación de las AGEBs en función del índice de marginación urbana se llevó a cabo a través de la estratificación realizada por CONAPO (2005) de las 29.562 AGEBs definidas en el país en cinco grupos. Cada intervalo representa un grado de marginación urbana: muy bajo (<-1,00936), bajo (de -1,00936 a -0,45735), medio (de -0,45735 a 0,09466), alto (de 0,09466 a 0,92267) y muy alto (>0,92267). De esta manera, se asociaron los grados de marginación urbana a los niveles socioeconómicos: a) el grado de marginación urbana muy bajo con un nivel socioeconómico residencial, b) grados de marginación bajo y medio con un nivel socioeconómico medio y c) grados de marginación alto y muy alto con niveles populares. En el municipio de Toluca el 41% de las 156 AGEBs consideradas como urbanas presentan una marginación baja, 24% son consideradas de nivel muy bajo, igual cantidad que las consideradas de nivel socioeconómico medio, mientras que el 5 y 6% son consideradas con un nivel muy alto y alto, respectivamente.

La demanda total para uso doméstico, con base en el PDM,

fue de 941,58 l·s<sup>-1</sup> (29,69 hm<sup>3</sup>/año), mientras que la demanda total con base en el grado de marginación urbana fue de 625,22 l·s<sup>-1</sup> (19,72 hm<sup>3</sup>/año).

Por otro lado, la estimación de demanda de agua para uso público urbano se realizó por medio de la Ec. 3. Para ello, la superficie de riego (Sup<sub>ncons</sub>) para servicios de educación se consideró como 34% del total del polígono de servicios públicos, y para servicios de salud se consideró de 50%, según las características de equipamiento urbano. La superficie mínima de terreno promedio para servicios de educación es de 1.088 m<sup>2</sup>/UBS mientras que para los servicios de salud es de 230 m<sup>2</sup>/UBS (SEDESOL, 2006). Los consumos de agua, de acuerdo con la normatividad mexicana (CONAGUA, 2007) fueron de 22,5 litros/alumno/turno en promedio para los servicios de educación, mientras que las necesidades de riego ascienden a 5 l·m<sup>2</sup>/día y las necesidades generadas por los empleados a 100 litros/trabajador/día. Para los servicios de salud se consideró 800 litros/cama/día.

El consumo estimado para todas las zonas de servicio es de 496,58 l·s<sup>-1</sup> (15,66 hm<sup>3</sup>/año), del cual, el servicio de salud requiere del 83,29%. Así mismo, la zona de servicio con el mayor porcentaje de requerimientos por servicio público (37,68%) es la que concentra un mayor tamaño en el servicio de salud, que es la zona denominada Centro 2. Además, se registra que sólo dos zonas de servicio deben abas-

tecer a los tres tipos de servicio: Calvario y Lomas Altas (Tabla III).

Por otra parte, las pérdidas físicas en el sistema de distribución presentan una mayor variabilidad espacial y temporal. Generalmente, en proyectos de diseño se considera un porcentaje del consumo total para la estimación de las pérdidas. CONAGUA (2007) sugiere, en caso de no contar con evaluaciones de fugas, considerar un valor entre 40 y 60% proveniente de un estudio de campo que involucró a 21 ciudades. En el caso de estudio, el balance entre volúmenes producidos y facturados resulta en un porcentaje de pérdidas del 26,72% (AyST, 2005). Debido a la diferencia existente entre los volúmenes de agua estimados en el presente estudio y por el organismo operador, se consideró razonable un porcentaje del 30%. Así, en la Tabla III se muestran las demandas totales por zona de servicio, por tipo de uso y la total. La demanda total estimada para el año de estudio (2005), considerando la información proveniente de las AGEBs, fue de 1544,54 l·s<sup>-1</sup>, difiriendo en 5,58% de la demanda reportada por el organismo operador. El porcentaje de pérdidas, así como el volumen estimado que se destina al servicio de salud provocan una diferencia altamente significativa en zonas como la 3 y 13 (116,1 y 262,5% respectivamente).

## Discusión

Con respecto a la estimación de la población, la diferencia principal entre las estimaciones del organismo operador y las estimaciones con base en el PDM radica en la distribución de la población dentro de las zonas de servicio, puesto que la variación promedio en el número de habitantes es cercano al 10% pero con una desviación estándar tres veces mayor. Por otro lado, la diferencia principal en las estimaciones del organismo operador y las estimaciones con base en las AGEBs es provocada por las densidades demográficas consideradas en cada caso. En efecto, el organismo operador considera una densidad demográfica constante (desviación estándar igual a cero), mientras que las AGEBs proporcionan información sobre la distribución espacial de la población en las zonas de servicio, es decir, los resultados parecen indicar que el organismo operador, y el PDM, basan sus estimaciones de densidad demográfica en la clasificación por nivel socioeconómico, mientras que las AGEBs tienen resultados más adecuados por los estudios de

campo realizados (censos y conteos de población).

En lo referente a la demanda de agua, cabe resaltar que según los reportes del organismo operador, se han tenido consumos domésticos por encima de lo que marcan las normas, pero con una tendencia a disminuir estos gastos. Por ejemplo, de 1998 a 2001 se tuvo un consumo doméstico promedio de 221 litr/hab/día (26 litr/hab/día más que lo marcado por reglamento), con una disminución paulatina de 365,41 litr/hab/día en enero 1998 hasta 196,61 litr/hab/día en octubre 2001 (AyST, 2005). Por otra parte, utilizando estimaciones realizadas con ayuda de un SIG y la información de las AGEBS, además de considerar valores de dotación marcados por normatividad (un promedio del consumo doméstico *per cápita* resultó de 203,12 litr/hab/día para el 2005), se cuenta con el conocimiento sobre la distribución espacial del agua tanto para consumos domésticos como para servicios públicos urbanos.

## Conclusiones

La delimitación espacial de zonas de abastecimiento hídrico resulta ser uno de los procesos más importantes en todo el estudio, pues define los valores de diseño y operación del sistema. En primer lugar, porque se ha reflejado de manera cuantitativa las costumbres en el uso de agua por medio de la dotación a los servicios públicos urbanos y domésticos. En segundo lugar por la relevancia que tiene, no sólo la estimación de la demanda total, sino el modo en que se va a distribuir en toda la zona de estudio. En este punto, las variables de vinculación, densidad demográfica, densidad de servicio público urbano y superficie mínima de construcción, son pilares primordiales de la metodología propuesta al definir las necesidades hídricas en un contexto espacial, información particularmente útil cuando no se tienen los dispositivos de medición de gastos suministrados en cada zona de servicio.

En el caso de estudio se encontraron obstáculos tales como la falta de orden en la distribución de agua a la red principal y la falta de información fundamentada en la estimación de la demanda. Estos problemas provocan, por un lado, una distribución tal que genera mayores presiones y fugas en zonas con menor volumen de agua demandado que el suministrado, y por otro lado, una mayor explotación y despilfarro de los recursos hídricos,

energéticos y económicos debido a la sobreestimación de la demanda.

La estimación de la demanda de agua con fundamento en el presente método puede proporcionar una base objetiva para estimar la dotación de agua para uso doméstico debido a la clasificación del nivel socioeconómico de acuerdo con estudios geostatísticos, independientemente de la presencia de un sistema de información de consumo. Así mismo, la localización y estimación de la demanda para los servicios públicos urbanos por medio de la ecuación propuesta en este trabajo (Ec. 3) facilita un control sobre la correcta distribución del agua suministrada a cada zona de servicio, gracias a la información sobre estructura urbana en la que está basada. Con ello, la metodología propuesta representa una mejora al proceso actualmente vigente en México, de estimar el valor de diseño de la demanda urbana de agua con información disponible a nivel nacional que incluye aspectos socioculturales y normativos a través del índice de marginación urbana y las características de equipamiento urbano.

Finalmente, si bien el método propuesto no sustituye la modelación de la demanda de agua a través de la macro- y micro-medición en redes de abastecimiento, proporciona información útil de una manera práctica a un bajo costo y, además, en la etapa de diseño donde no existen estos registros puede ser el método que ofrece objetividad en sus resultados.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se llevó a cabo con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT, México) y la Universidad Autónoma del Estado de México por medio de los proyectos 23478, 2234/2006 y 2753/2009C, respectivamente.

## REFERENCIAS

- Alcocer VH, Tzatchkov V (2009) Estimación de parámetros del consumo instantáneo de agua potable de lecturas acumuladas. *Ing. Inv. Tecnol.* 10: 237-246.
- Alcocer VH, Tzatchkov V, Bourguett V (2008) Desagregación temporal de lecturas acumuladas de consumo de agua potable por medio de métodos estocásticos. *Interciencia* 33: 725-732.
- Anzaldo C, Prado M (2009) *Índice de Marginación Urbana 2005*. Consejo Nacional de Población. México. 41 pp.
- Arbués F, García-Valiñas MA, Martínez-Espi-

ñera R (2003) Estimation of residential water demand: a state-of-the-art review. *J. Soc-Econ.* 32: 81-102.

- Ashu J, Ashish KV y Umesh CJ (2001). Short-term water demand forecast modelling at IIT Kanpur using artificial neural networks. *Water Resour. Manag.* 15: 299-321.
- AyST (2005) *Plan Maestro de Infraestructura Hidráulica del Sistema de Agua Potable de la Cd. de Toluca, Edo. de México*. Reporte interno. H. Ayuntamiento de Toluca. Toluca, México:
- Ayuntamiento de Toluca (2003) *Plan de Desarrollo Municipal*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda. Gobierno del Estado de México. México. 467 pp.
- Caire G (2005) Conflictos por el agua en la cuenca Lerma- Chapala, 1996-2002. *Reg. Soc.* 17: 73-125.
- Carter DW, Milon JW (2005) Price knowledge in household demand for utility services. *Land Econ.* 81: 265-283.
- Chen Z, Ngo HH, Guo WS, Listowski A, O'Halloran K, Thompson M, Muthokaruppan M (2012) Multicriteria analysis towards the new end use of recycled water for household laundry, a case study in Sydney. *Sci. Total Env.* 438: 59-65.
- Clark WA, Finley JC (2008) Household water conservation challenges in Blagoevgrad, Bulgaria: a descriptive study. *Water Int.* 33: 175-188.
- CONAGUA (1994) *Lineamientos Técnicos para la Elaboración de Estudios y Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario*. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 236 pp.
- CONAGUA (2007) *Datos básicos*. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 79 pp.
- CONAGUA (2009). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (1501) Valle de Toluca, Estado de México*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 40 pp.
- CONAPO (2005) *Índice de Marginación Urbana 2005*. [www.conapo.gob.mx/publicaciones/IMU2005/IMU2005\\_principal.pdf](http://www.conapo.gob.mx/publicaciones/IMU2005/IMU2005_principal.pdf) Consejo Nacional de Población. Secretaría de Gobernación. México (Cons. 21/09/2009).
- Dalhuisen JM, Florax RJGM, de Groot HLF, Nijkamp P (2003) Price and income elasticities of residential water demand: a meta-analysis. *Land Econ.* 79: 292-308.
- DHI (2011). *MikeUrban - Modelling Water in the City*. <http://mikebydhi.com> (Cons. 03/10/2011).
- Eastman JR (2006) *IDRISI Andes Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Clark University. Worcester, MA, EEUU. 327 pp.
- Idowu OA, Awomeso JÁ, Martins O (2012) An evaluation of demand for and supply of potable water in an urban center of Abeokuta and environs, Southwestern, Nigeria. *Water Resour. Manag.* 26: 2109-2121.

- IMTA (2010). *Censo Acuífero Valle de Toluca*. Reporte interno. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, México.
- INEGI (2010) *Resultados Preliminares. Censo de Población y Vivienda 2010*. www.inegi.org.mx/ Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. (Cons. 24/02/2010).
- InfoWorks (2011) *InfoWorks WS*. www.innovyze.com (Cons. 03/10/2011).
- IRIS-SCINCE (2007) *II Censo de Población y Vivienda 2005* (Paquete informático) Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. México.
- Jorgensen B, Graymore M, O'Toole K (2009). Household water use behavior: an integrated model. *J. Env. Manag.* 91: 227-236.
- Panagopoulos GP, Bathrellos GD, Skilodimou HD, Martsouka FA (2012) Mapping urban water demands using multi-criteria analysis and GIS. *Water Resour. Manag.* 26: 1347-1363.
- Renzetti S (2002) *The Economics of Water Demands*. Kluwer. Boston, MA, EEUU. 194 pp.
- Ruijs A, Zimmermann A, van den Berg M (2008) Demand and distributional effects of water pricing policies. *Ecol. Econ.* 66: 506-516.
- Schleich J, Hillenbrand T (2009). Determinants of residential water demand in Germany. *Ecol. Econ.* 68: 1756-1769.
- SEDESOL (2006) *Sistema Normativo de Equipamiento Urbano*. http://sedesol2006.sedesol.gob.mx Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda. Secretaría de Desarrollo Social. Dirección General de Infraestructura y Equipamiento. México. (Cons. 21/09/2009).
- Strand J, Walker I (2005) Water markets and demand in Central American cities. *Env. Devel. Econ.* 10: 313-335.
- Tzatchkov V, Alcocer VH, Bourguett V (2008) Sectorización de redes de distribución de agua potable a través de algoritmos basados en la teoría de grafos. *Tláloloc* 40: 14-22.
- WorldClim (2006) *Mean Temperature Layer. Zone 22*. Resol.: 30 arcsec. World Climate Organization. www.worldclim.org/ (Cons. 09/10/2009).

## URBAN WATER DEMAND IN MEXICO: SPATIAL MODELING BASED ON GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

Carlos Roberto Fonseca Ortiz, Carlos Díaz-Delgado, Marivel Hernández Téllez and María Vicenta Esteller Alberich

### SUMMARY

*This paper proposes a method that facilitates urban water demand modeling estimations where the customer information system (CIS) is lacking or inadequate, based on a geographic information system (GIS). This method determines a per capita water supply based on socioeconomic status, according to the urban marginalization classification defined for each geostatistical basic area (AGEB), provided by the National Institute of Statistics and Geography in Mexico. For the year of study, 2005, a comparison between water demands estimation by the*

*Toluca, Mexico, city water agency and this method based on AGEBS information has been done. It can be concluded that problems like an inadequate water distribution could be solved through spatial representations of projected demand. Thus, the water supply strategy design includes an appropriate control tool for the planning and management of water resources. Furthermore, projection and supply water flow monitoring will allow the analysis of water needs by type of use and its reduction within a water-saving culture framework.*

## DEMANDA HÍDRICA URBANA NO MÉXICO: MODELADO ESPACIAL BASEADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Carlos Roberto Fonseca Ortiz, Carlos Díaz-Delgado, Marivel Hernández Téllez e María Vicenta Esteller Alberich

### RESUMO

*O presente trabalho propõe um método que facilita o modelado para estimar a demanda de água para usos urbanos baseada em um sistema de informação geográfica (SIG) onde o sistema de informação de consumo (SIC) é inexistente ou insuficiente. Este método determina um fornecimento de água baseado no nível socioeconômico de acordo com a classificação de marginalidade urbana definida para cada uma das áreas geo-estatísticas básicas (AGEB) que proporciona o Instituto Nacional de Estatística e Geografia no México. Para o ano de estudo, 2005, se efetuou uma comparação entre as estimativas da demanda de água realizadas pelo organismo operador da*

*água em Toluca, México, e o presente método, utilizando as AGEBS. Esta comparação permite concluir que problemas como uma inadequada distribuição de água podem ser solucionados por meio desta proposta, utilizando representações espaciais da demanda projetada. Desta maneira, é possível desenhar estratégias no subministro de água potável contando com uma ferramenta de controle para a administração e planificação do recurso hídrico. Adicionalmente, o acompanhamento do gasto de água projetada e subministrada permitirá uma análise sobre o volume requerido por tipo de consumo e sua redução no marco da cultura de poupança de água.*