



## DETERMINANDO PATRONES GEOGRÁFICOS DEL CONSUMO DE AGUA DOMÉSTICA EN HERMOSILLO, SONORA

ARTURO OJEDA DE LA CRUZ\*, JESÚS TREVIÑO CANTÚ,  
MARCO ANTONIO RAMOS CORELLA, JESÚS QUINTANA PACHECO

### RESUMEN

En este artículo se presenta un análisis urbano del consumo de agua doméstica identificando su distribución espacial, aplicando la técnica del Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (ESDA por sus siglas en inglés) y utilizando el sistema GeoDa. Dicho análisis y metodología es aplicado al caso de estudio de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México, para determinar los patrones espaciales del consumo de agua, innovando un proceso para la integración de los consumos de agua doméstica a nivel de Colonia y de Área Geostatística Básica (AGEB) aceptable para ciudades en desarrollo en donde prevalece el crecimiento urbano horizontal.

**Palabras clave:** Consumo de agua doméstica, colonia, AGEB, autocorrelación espacial.

### ABSTRACT

*This article presents an analysis of urban domestic water consumption identifying their spatial distribution, applying the technique of Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) and using the GeoDa system. This analysis and methodology is applied to the case study of the city of Hermosillo, Sonora, Mexico to determine the spatial patterns of water consumption, innovating a process for integrating the consumption of domestic water level in a Town Colony and in a Basic Geostatistical Area (AGEB in spanish) being acceptable for developing cities where horizontal urban growth prevails.*

**Keywords:** Consumption of domestic water, town colony, AGEB, spatial autocorrelation

DR. ARTURO OJEDA DE LA CRUZ  
Depto. de Ing. Civil y Minas,  
Universidad de Sonora  
Correo: ojeda@dicym.uson.mx  
DR. JESÚS TREVIÑO CANTÚ  
Facultad de Arquitectura,  
Universidad Autónoma  
de Nuevo León  
Correo: jltreviño41@hotmail.com

DR. MARCO ANTONIO RAMOS CORELLA  
Depto. de Ing. Civil y Minas,  
Universidad de Sonora  
Correo: marco.ramos@dicym.uson.mx  
DR. JESÚS QUINTANA PACHECO  
Depto. de Ing. Civil y Minas,  
Universidad de Sonora  
Correo: quintana@dicym.uson.mx

\*Autor para correspondencia: DR. Arturo Ojeda de la Cruz  
Correo electrónico: ojeda@dicym.uson.mx  
Recibido: 20 de septiembre de 2015  
Aceptado: 26 de noviembre de 2015  
ISSN: 2007-4530

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha hablado cada vez más del tema del agua, siendo un tema destacado en las Cumbres de la Tierra, organizadas por la ONU, en Río de Janeiro, Brasil (1992), y en Johannesburgo, Sudáfrica (2002). En la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro se concluyó que las presiones ambientales derivadas del crecimiento de la población, la urbanización y la industrialización, se han convertido en un importante tema de preocupación internacional; mientras que en la de Johannesburgo se hace una invitación a introducir cambios fundamentales en la forma en que se producen y se consumen los recursos hídricos, apostando a fondo por la eficiencia y sostenibilidad de la gestión de este recurso en el mundo [1]. En ese sentido, en la Conferencia Río+20 (nombre abreviado de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible que tuvo lugar en Río de Janeiro en 2012, veinte años después de la histórica cumbre de 1992), también se reconoció que el agua es un elemento básico del desarrollo sostenible pues está estrechamente vinculada a diversos desafíos [2].

Los estudios y análisis del agua urbana se han centrado básicamente en abordar los problemas de calidad y fiabilidad del suministro del agua; sin embargo, se ha prestado poca atención a la manera en que el consumo urbano de agua varía entre las zonas urbanas y cómo



este hecho podría ser utilizado para dar forma a un nuevo enfoque para la planificación y gestión [3]. Ya que los patrones de uso del agua no están distribuidos uniformemente en el espacio y tiempo, viéndose afectados no sólo por las variables socioeconómicas, climáticas y propiedades físicas, sino también por la ubicación geográfica de una región y sus interacciones con otras regiones adyacentes; el resultado de este sesgo espacial es que los hogares tienden a utilizar el agua a un nivel comparable de sus vecinos en esa geografía, independientemente de sus características demográficas y económicas [4, 5 y 6].

En ese contexto, existen pocos estudios que comparen los diferentes patrones de consumo de agua del urbanismo compacto versus urbanismo difuso o que intenten analizar cómo los diferentes factores influyen en el consumo de agua doméstica [7]. Modificar el patrón físico del desarrollo urbano es una forma a considerar para aumentar la conservación del agua [8], por lo que se hace necesario comprender la dinámica del consumo de agua en relación con la estructura espacial urbana [9]. Ahora la conservación del agua se centra en los programas y niveles de eficiencia que puede llegar a ser parte de un estilo de vida de los residentes. Las eficiencias estructurales asociadas a viviendas nuevas y de mayor densidad de desarrollo urbano reducen de inmediato el impacto de



la escasez, pero también traen beneficios a largo plazo al reducir los costos de aumento de la infraestructura y la oferta [10].

El objetivo del presente artículo es determinar los patrones espaciales del consumo de agua doméstica en la ciudad de Hermosillo a través del Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (ESDA por sus siglas en inglés), partiendo de los consumos de agua mensuales de las viviendas que registró el organismo operador de agua de Hermosillo en el año 2010.

### Zona de estudio

El estado de Sonora se localiza en una región desértica del territorio nacional denominado Desierto de Sonora, el cual territorialmente se extiende en dos países, México y Estados Unidos. Dicho desierto se amplía hacia el sur de Estados Unidos de América a través de los estados de Arizona y California, y en México por los estados de Baja California y Sonora. La ciudad de Hermosillo es la capital del estado de Sonora, localizada a 216 metros sobre el nivel del mar, en la parte central poniente de la planicie costera de Sonora del noroeste de México, se ubica geográficamente en los 29° 06' de Latitud Norte y 110° 58' de Longitud Oeste (Figura1).

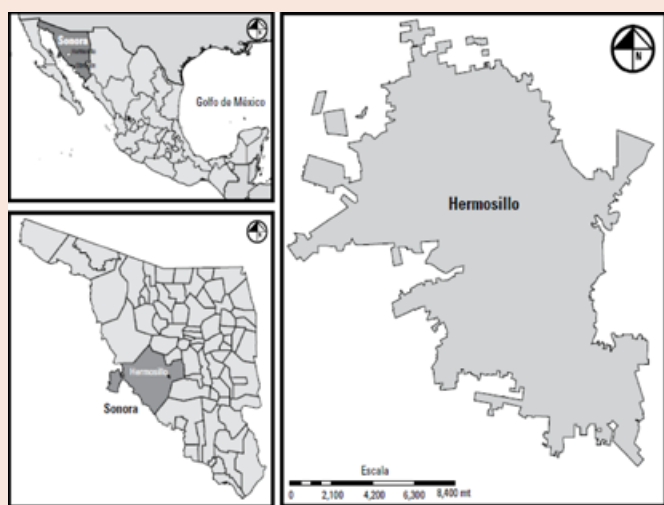


Figura 1. Localización general de Hermosillo.

### METODOLOGÍA

Se gestiona en el organismo operador de Agua de Hermosillo (AGUAH) la información de los consumos de agua potable de las viviendas para el año 2010, se utiliza la información cartográfica creada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) para el censo 2010. Se utilizan sistemas de información geográfica para integrar los consumos de agua doméstica a nivel de Área Geoestadística Básica (AGEB), y finalmente se aplica la técnica del ESDA partiendo de los consumos de agua doméstica de los hogares en las colonias que tienen servicio medido en la vivienda.

La hipótesis única que se estableció es que los consumos de agua del sector doméstico varían en la geografía de la ciudad, logrando identificarse zonas geográficas de alto y bajo consumo de agua en sitios de alta plusvalía y de bajo nivel económico, respectivamente.

### ANÁLISIS URBANO

#### Consumo de agua doméstica

El organismo AGUAH registra la información de consumos de agua con una periodicidad mensual para cada una de las viviendas, de manera que los usuarios reciben la factura cada mes para el pago de su consumo. Tales registros aparecen sólo a nivel de vivienda. La base de datos de los consumos de agua del año 2010, requirió ser organizada y transferida para poder integrarla a una nueva base de datos que se utilizó para el análisis estadístico espacial. En el proceso dinámico de la base de datos de las colonias o barrios se identificaron con su nombre oficial y están conformadas por el grupo de viviendas, según su localización geográfica en la ciudad. En algunas colonias se tuvieron pocos meses con información de consumo de agua, debido a que la vivienda era de reciente construcción y recién habitada, o bien porque estuvo sin habitar unos meses y se habitó nuevamente durante el mismo año. La extensión de la base de datos fue 143,373 registros que corresponden a las viviendas que cuentan con medidor (servicio medido).





### Integración del consumo de agua a nivel Colonia y AGEB

De la información recolectada en el organismo operador, se determinó el consumo promedio mensual del agua para cada una de las colonias en el año. Fue determinante aplicar dos criterios: la media y la mediana. Al inicio la media, y en un segundo paso la mediana. La media fue utilizada para obtener el consumo medio anual en cada una de las viviendas pertenecientes a las colonias

incluidas en la base de datos. En un segundo paso, se aplicó la mediana para obtener el consumo medio anual representativo en la colonia, lo cual es debido a que la mediana suaviza los valores extremos. La tabla 1 resume como ejemplo los consumos de agua en la Colonia 5 de Mayo en Hermosillo, Sonora. Puede observarse que cada uno de los renglones de dicha tabla corresponde al registro del consumo de agua en una vivienda en metros cúbicos. Los valores de la última columna indican el promedio anual para cada vivienda.

Tabla 1. Consumo de agua (m<sup>3</sup>) en la Colonia 5 de Mayo en Hermosillo, Sonora.

Colonia/vivienda	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Promedio anual por vivienda
5 Mayo (A)	15	12	12	12	12	12	12	12	15	12	12	12	12.5
5 Mayo (A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	3.08
5 Mayo (A)	5	1	0	7	3	5	11	14	6	6	5	5	5.67
5 Mayo (A)	54	53	53	53	52	52	51	52	51	50	51	0	47.67
5 Mayo (A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	3.08
5 Mayo (A)	17	14	12	12	9	9	15	14	14	11	13	40	15.00
5 Mayo (A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	37	5.17
5 Mayo (A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	2.25
5 Mayo (A)	2	7	0	3	2	2	0	1	0	1	0	0	1.50
5 Mayo (A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	3.08
5 Mayo (A)	16	12	14	17	16	25	21	31	20	19	15	19	18.75
5 Mayo (A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	3.08
5 Mayo (A)	23	21	18	21	18	18	18	19	27	22	22	17	20.33
5 Mayo (A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	1.67
5 Mayo (A)	26	23	20	25	21	22	22	20	23	21	18	18	21.58
5 Mayo (A)	15	14	15	5	12	26	14	27	16	16	20	19	16.58
5 Mayo (A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37	3.08
5 Mayo (A)	21	15	18	22	17	21	27	19	23	22	21	23	20.75
<b>Mediana</b>													<b>5.42</b>



El valor final que representa el consumo medio en las viviendas censadas de la colonia resulta  $5.42 \text{ m}^3$  fue obtenido a través de la mediana. Derivado de ello, se obtiene el consumo de agua promedio mensual en el año, como un valor representativo en cada una de las colonias, generando así una lista de 538 colonias conforme al registro que posee el organismo AGUAH para el año de estudio. Para integrar el consumo de agua a nivel AGEB, fue necesario innovar otro procedimiento que permitiera transferir los consumos de agua promedio representativo de las colonias hacia los AGEB de la zona urbana, conforme al porcentaje de intersección que tiene cada colonia en un AGEB determinado, teniendo Hermosillo en 2010 un total de 500 AGEB de acuerdo a la cartografía de INEGI 2010.

Para concretar este proceso de transferencia geoespacial de los datos de consumo de agua, fue necesario gestionar en el catastro municipal la información cartográfica, relativa a los polígonos geográficos que representen a las colonias de Hermosillo. El proceso de transferencia fue realizado mediante ArcGis 9.3. Este proceso de intersección de superficie urbana lo consideramos aceptable en virtud de que la ciudad mantiene un crecimiento urbano horizontal, por lo que, territorialmente es tolerable. Por lo que, una primera representación gráfica de la distribución espacial del consumo de agua doméstica en la ciudad se indica en el mapa temático de la figura 2. Los rangos de consumo de agua que muestra dicha figura en los estratos son valores medios mensuales, de tal forma que para conocer el valor medio anual del consumo en un estrato geográfico de los indicados, es cuestión de multiplicar el valor por doce, que corresponde a los meses del año. Se distingue que el consumo más alto (color negro fuerte) se genera en la zona noreste de la ciudad y en un sector identificado al poniente de Hermosillo, donde se ubican viviendas tipo residencial de alta plusvalía. Puede verse también que el consumo de agua medio mensual oscila entre un mínimo de cero a un máximo de 200,125 litros, con un valor medio de 17,082 litros; y una desviación estándar de 25,826 litros.

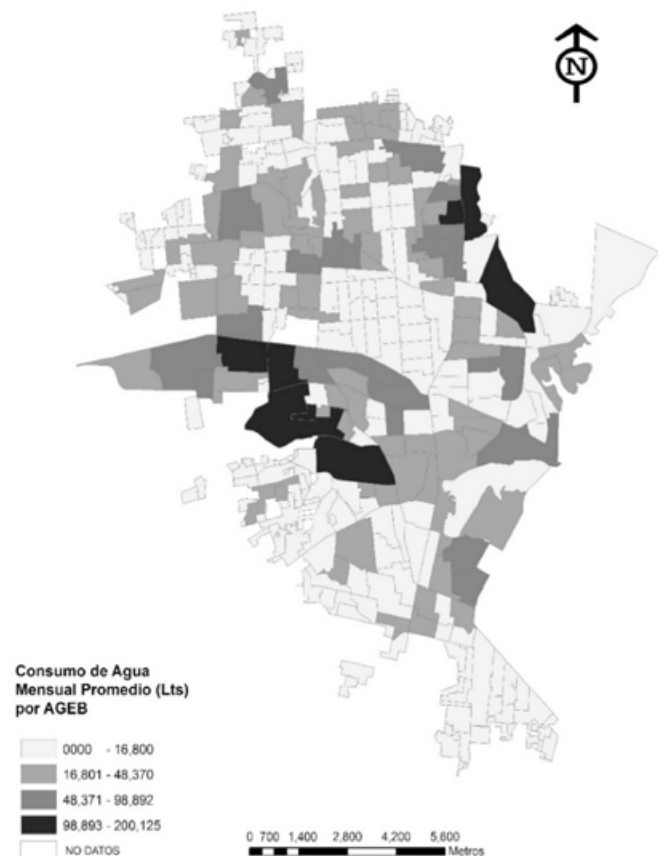


Figura 2. Distribución geográfica del consumo de agua doméstica en Hermosillo, Sonora.

Por otro parte, al graficar los consumos de agua registrados por el organismo operador en 2010 (Figura 3), puede constatar que un consumo aceptable en las viviendas sería en promedio entre  $16 \text{ y } 17 \text{ m}^3/\text{mes}$  (16,000 y 17,000 Lts/mes).



Figura 3. Consumo de agua (Lts/mes) en los hogares de Hermosillo.

### Análisis exploratorio de datos espaciales

Las pruebas para la autocorrelación espacial están diseñadas para cuantificar el grado de agrupamiento y para permitir la inferencia estadística. El principio común que les subyace es la comparación del valor de la estadística para un determinado conjunto de datos para su distribución bajo la hipótesis nula de "no autocorrelación espacial". Dicha hipótesis implica que el espacio no importa, o, que la asignación de valores a determinadas localizaciones es irrelevante. En contraste bajo la hipótesis alternativa de autocorrelación espacial (dependencia espacial), el interés se centra en casos en donde los valores grandes están sistemáticamente rodeados de otros valores grandes; o los valores pequeños están rodeados de otros valores pequeños, y viceversa [11]. La autocorrelación espacial es una técnica estadística que considera la localización territorial de los datos de una variable. El punto de partida en esta técnica es que hay eventos en un punto del espacio urbano que son influenciados significativamente por lo que ocurre en lugares aledaños [12].

Es posible determinar la medición de la autocorrelación espacial global a través del Índice de Moran (I de Moran) global, cuyo propósito fundamental es contrastar la hipótesis nula de "ausencia de autocorrelación espacial", frente a la hipótesis alternativa de "existencia de autocorrelación espacial", ya sea positiva o negativa. El valor del I de Moran global se determina a través de la ecuación [11]:

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j W_{ij} Z_i Z_j}{S_0 \sum_i Z_i^2} \quad (1)$$

Donde  $N$  es el total de áreas espaciales,  $\mu$  es la media de la variable  $X_i$ ,  $W_{ij}$  es la medida del peso espacial de la contigüidad, con  $Z_i = (X_i - \mu)$  y también  $Z_j = (X_j - \mu)$ , siendo  $S_0 = \sum_i \sum_j W_{ij}$  es un factor de normalización igual a la suma de pesos de la matriz de las unidades espaciales vecinas;  $X_i$  es el valor de la variable en una unidad espacial determinada;  $W_{ij}$  es la variable en una localización espacial vecina.

Los valores del I de Moran global varían entre 0, -1 y 1. Siendo el valor de 0 un caso de ausencia de autocorrelación (sin tendencia). El valor -1 indica autocorrelación negativa (patrón disperso), y el valor 1 indica autocorrelación positiva (patrón agrupado -clúster-).

La autocorrelación espacial existe cuando una variable desarrolla valores similares en unidades geográficamente cercanas dando lugar a clústeres. Se tiene que áreas con alto consumo de agua pueden ser vecinas de otras áreas de alto consumo, High-High (H-H). Existen también valores de bajo consumo rodeados de valores bajos, Low-Low (L-L).





Sin embargo, el  $I$  de Moran global sólo contrasta la hipótesis de autocorrelación espacial de la variable en todo el territorio donde el resultado puede ser positivo (clúster) o negativo (dispersión); pero no atiende la significancia de las observaciones locales.

Esta última significancia corresponde al  $I$  de Moran local, denominado Indicador Local de Autocorrelación Espacial (LISA por sus siglas en inglés). En ese caso, sí es posible obtener un índice para cada área geográfica de la zona en estudio, para identificar el grado de dependencia individual de cada área espacial respecto a las demás áreas [13]. Al efectuar el cálculo del  $I$  de Moran global mediante el software GeoDa versión 1.4.0 se consideraron contigüidades del tipo reina (vecindades en todas direcciones), misma que se denominó en este trabajo HILLOqueen. Resultando un índice positivo  $I = 0.324234$  que indica una autocorrelación espacial positiva, según el diagrama de dispersión de la figura 4. Los datos del consumo de agua a nivel de AGEB utilizados en este cálculo son directos, es decir, no fueron normalizados en esta etapa, lo cual parte de la consideración de que los outliers generales no son necesariamente outliers espaciales, siendo que tampoco modifica la clusterización obtenida, la cual se explica más adelante.

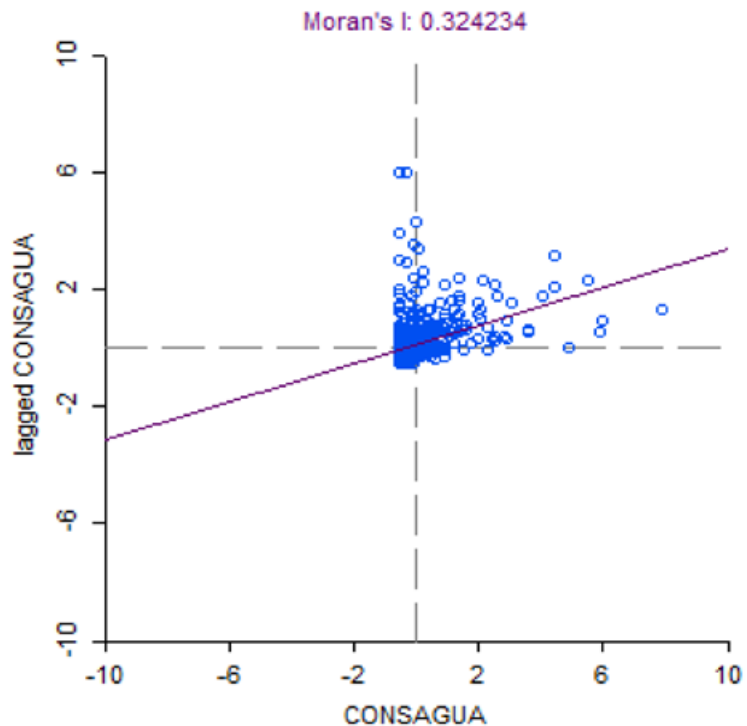


Figura 4. Diagrama de dispersión del  $I$  de Moran global.

En la figura 4, la nube de puntos de la mayor parte de los consumos de agua queda dentro del cuadrante I (superior derecho) de autocorrelación positiva tipo alto-alto (H-H), y otros en menor cantidad en el cuadrante III (inferior izquierdo) de autocorrelación positiva tipo bajo-bajo (L-L). La significancia estadística del  $I$  de Moran global es obtenida con el parámetro p-valor, mismo que permite revisar la hipótesis nula "Ho" de no autocorrelación espacial. En ese proceso el programa GeoDa utiliza permutaciones, de manera que al

procesar con 9,999 permutaciones resulta un p-valor = 0.000100 siendo el  $I$  de Moran global estadísticamente significativo con el p-valor < 0.05 (5%). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula  $H_0$  de no autocorrelación espacial, ya que sí existe autocorrelación espacial positiva en el consumo de agua doméstica. El resultado final se muestra en dos mapas de salida, uno expone la significancia estadística (izquierdo), y el otro mapa (derecho) expone los clústeres que representan los sectores urbanos con los patrones de consumo de agua en el nivel H-H, o L-L, y valores combinados (Figura 5).

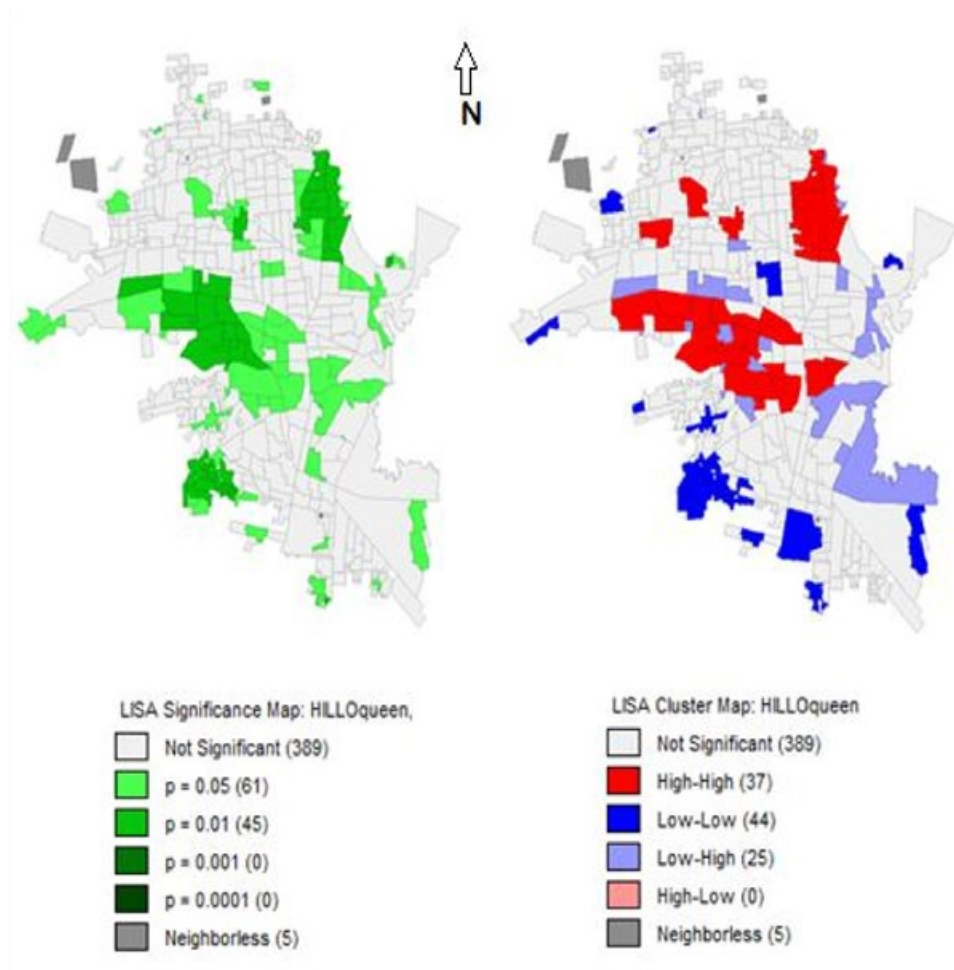


Figura 5. Patrones de consumo de agua en Hermosillo, Sonora y su significancia estadística.

Los dos mapas de salida son trazados en la cartografía de Hermosillo a través del sistema GeoDa, señalando el primer mapa (izquierda) que en 389 AGEB no existe significancia estadística. En dicho mapa, un sector geográfico ilustra que el nivel de significancia estadística es muy alto en una seguridad del 99% con p-valor = 0.01 en 45 AGEB, tales áreas son de color verde fuerte y corresponden al sector noreste de Hermosillo y a ciertas zonas del sector poniente; mientras que en 61 AGEB se tiene un p-valor = 0.05 correspondiendo a la zona centro sur, y en menor superficie al noreste y poniente de la ciudad principalmente.

El segundo mapa (derecha) ilustra la presencia de clústeres, que corresponden a los AGEB de alta significancia estadística ya mencionados. Dos amplias áreas de color rojo indican zonas de alto consumo de agua, rodeadas de alto consumo (H-H) ubicadas en 37 AGEB referidos en el sector noreste y poniente.





En el norte de Hermosillo se observan tres zonas de menor área que muestran un patrón de consumo H-H. Con menor significancia existen pequeñas áreas que tienen un patrón de consumo distinto (L-H) estadísticamente significativas con  $p = 0.05$  en 25 AGEB del mapa de clúster.

Derivado de la autocorrelación espacial positiva, dos zonas amplias al sur de la ciudad, ilustran patrones de bajo consumo de agua (L-L) en 44 AGEB en color azul fuerte con alta significancia estadística ( $p = 0.01$ ), sobresalen al sur viviendas de bajo nivel socioeconómico, similares a las islas norte y oriente. La tabla 2 resume los clústeres.

Tabla 2. Resumen de clústeres derivados de LISA.

Clúster	Cantidad de AGEB	Porcentaje (%)
High-High (H-H)	37	7.4
Low-Low (L-L)	44	8.8
Low-High (L-H)	25	5.0
High-Low (H-L)	0	0.0
No significativa	389	78.0
Vecinos aislados (no aplica NA)	5 NA	1 NA
<b>Total</b>	<b>500</b>	<b>100.0%</b>

## CONCLUSIONES

Fue posible diferenciar algunas vertientes que inciden en el conocimiento de la problemática urbana referente a los consumos de agua doméstica al determinar los patrones de consumo de agua. La significancia estadística existe en 106 AGEB destacando dos amplios clústeres de consumos H-H, y L-L.

Este conocimiento puede otorgar beneficio en las futuras etapas de planificación urbana de Hermosillo, lo cual puede favorecer una ruta más sustentable al crear políticas para reducir los consumos de agua, una mejor planificación de la infraestructura y el desarrollo urbano, así como el rediseño del sistema de tarifas.

La aplicación de la técnica ESDA y del sistema GeoDa, con la aplicación del concepto LISA son una eficaz y poderosa herramienta que facilita la identificación y visualización de patrones espaciales de una variable dependiente, sea en este caso el consumo de agua doméstica, pudiendo ser otras variables, tales como energía, residuos, valor del suelo y niveles de pobreza urbana, empleo, etcétera.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) Agenda 21 local. Plan Municipal de gestión de la demanda de agua en la ciudad de Madrid, Gobierno de Medio Ambiente y Servicios de la Ciudad, 2005.
- 2) Organización de las Naciones Unidas, ONU. El futuro que queremos. Conferencia de las Naciones Unidas, Rio+20, 2012.

- 3) Troy, A., & Holloway, D. The use of residential water consumption as an urban Planning tool: A pilot study in Adelaide. *Environmental Planning and Management*, (47), pp. 97- 114, 2004.
- 4) House Peter, L., Pratt, B., & Chang, H. Effects of urban spatial structure Sociodemographic, and climate on residential water consumption in Hillsboro, Oregon. *American Water Resources Association*. 46 (3), pp.461-472, 2010.
- 5) Wentz, E., & Gober, P. Determinants of Small-Area Water Consumption for the City of Phoenix, Arizona. *Water Resources Management*, 21. pp. 1849-1863, 2007. [6] Franezyk, J.; Chang, H. Spatial analysis of water use in Oregon, USA, 1985-2005. *Water Resources Management*, 23, pp. 755-774, 2009.
- 7) March, H., & Saurí, D. The suburbanization of water scarcity in the Barcelona Metropolitan Region: Sociodemographic and urban changes influencing domestic water conservation. *The Professional Geographer*. Vol. 62, (1), pp. 32-45, 2010.
- 8) Shandas, V., & Parandvash, G. "Integrating urban form and demographics in water- demand management: an empirical case study of Portland, Oregon. *Environment and Planning*, pp.1-18, 2009.
- 9) Chang, H., Parandvash, G., & Shandas, V. Spatial variations of single-family Residential water consumption in Portland, Oregon. *Urban Geography*, 31, 7: 953-972, 2010.
- 10) Balling, R., Gober, P., Jones, N. Sensitivity of residential water consumption to variations in climate: An intra-urban analysis of Phoenix, Arizona. *Water Resources Research*, 44, W10401, pp. 1-11, 2008.
- 11) Anselin, L. *Spatial data analysis with GIS: An introduction to application in the Social sciences*. National Center for Geographic Information and Analysis.

