

Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica

Recibido: 16 de julio de 2012. Aceptado en versión final: 8 de septiembre de 2012.

Rolando Enrique Díaz Caravantes*

Luis Carlos Bravo Peña**

Luis Carlos Alatorre Cejudo**

Erick Sánchez Flores***

Resumen. En este estudio se identifican las regiones con mayor presión antropogénica sobre el agua subterránea en México. La información para identificar estas áreas corresponde a los registros georreferenciados de 314 292 derechos de agua subterránea que especifican el volumen concesionado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En este estudio se construyeron tres indicadores, representados en mapas de densidad de tipo Kernel, que muestran la distribución espacial a partir de los registros puntuales de los derechos de agua. Los indicadores obtenidos: *a)* densidad geográfica según la cantidad de pozos, *b)* volumen concesionado y *c)* profundidad de perforación, describen por separado diferentes componentes de la presión antropogénica sobre las aguas subterráneas y permiten generar en conjunto una

cartografía de la presión ejercida sobre los acuíferos del país. Los resultados requieren complementarse con estudios hidrogeológicos regionales que indiquen con precisión el grado de afectación de los acuíferos por la extracción de agua subterránea; sin embargo, los resultados por sí mismos dejan ver una presión muy alta en las regiones del Bajío, la Comarca Lagunera y el Centro-Oeste del estado de Chihuahua. Estos hallazgos se discuten desde una perspectiva geográfica, demostrando la utilidad de incorporar indicadores ambientales para evaluar la presión ejercida sobre los recursos hídricos del país.

Palabras clave: Presión antropogénica, agua subterránea, México, derechos de agua.

Anthropogenic pressure on groundwater in Mexico: a geographical approach

Abstract. In this study we identified regions with the highest anthropogenic pressure on groundwater in Mexico. The information used to identify these areas was based on the 314,292 groundwater rights specified by the National Water Commission (CONAGUA). In the research we calculated three indicators, represented as Kernel density maps, which show the spatial distribution of the groundwater rights. The

indicators: *a)* geographic density of wells, *b)* concessioned volume, and *c)* drilling depth, describe separately different components of human pressure on groundwater and allow to generate a combined pressure mapping on the aquifers of Mexico. The results of this work must be complemented with regional hydrogeological studies that indicate accurately the disturbance of aquifers by groundwater extraction,

* El Colegio de Sonora, Calle Obregón No. 54, Col. Centro, 83000, Hermosillo, Sonora. E-mail: rdiaz@colson.edu.mx

** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, División Cuauhtémoc, calle Morelos y privada del Roble 101, 31579, Cuauhtémoc, Chihuahua. E-mail: luis.bravo@uacj.mx ; luis.alatorre@uacj.mx

*** Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. del Charro, 450 N, 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua. E-mail: esanchez@uacj.mx

however, the results reveal themselves a very high pressure in the regions of El Bajío, la Comarca Lagunera and the midwest of Chihuahua. These findings are discussed from a geographic perspective, demonstrating the usefulness of

incorporating environmental indicators to assess the pressure on water resources in the country.

Key words: Anthropogenic pressure, groundwater, Mexico, water rights.

INTRODUCCIÓN

El agua disponible en el mundo es de aproximadamente 1 386 millones de km³, de los cuales solo el 2.5% es agua dulce. La mayor porción de agua dulce (68.7%) se concentra en forma de hielo en los glaciares y las regiones montañosas; el 29.9% está almacenada en acuíferos; y solamente el 0.26% se encuentra en lagos, embalses y ríos (Shiklomanov, 1998). Al observar la cantidad de agua dulce disponible en función de los escurrimientos globales es importante considerar que la cantidad de agua almacenada en todos los ríos del mundo es de 2 000 km³, mucho menor que la extracción anual de 3 800 km³ (Oki y Kanae, 2006). En las últimas décadas se ha reconocido que existe una crisis global en cantidad y calidad de agua dulce. En términos generales, el crecimiento poblacional y económico han sido los cambios más importantes que han llevado a esta situación. En el reporte mundial, *World Water Vision: Making Water Everybody's Business*, se estima que a nivel global el 20% de la población no tiene acceso a agua potable y que el 50% no tiene acceso a un adecuado saneamiento (Cosgrove y Rijsberman, 2000).

De acuerdo con Shiklomanov (1998), alrededor de 10 000 000 de km³ de agua dulce están almacenados en acuíferos. El agua subterránea es utilizada por cerca de dos mil millones de personas en todo el mundo, con una extracción anual de entre 600 y 700 km³, que es aproximadamente el 20% del consumo de agua dulce (Struckmeier *et al.*, 2005; Shiklomanov, 1998). Entre las actividades económicas, la agricultura es el mayor consumidor de agua en todo el mundo (70%), seguido por la industria (20%) y los hogares (10%), (Struckmeier *et al.*, 2005). En términos globales, el agua superficial es, por mucho, la más importante fuente de abastecimiento. Sin embargo, este panorama es diferente en muchas zonas del mundo conforme el agua subterránea va suplantando al agua superficial

como la fuente primaria y preferida de agua, como en el caso del sur de Asia, donde el agua subterránea provee ya aproximadamente el 50% de agua para riego (Giordano y Villholth, 2007). Asimismo, es reconocido que las aguas subterráneas se han convertido en la fuente principal del recurso hídrico en las socioeconomías urbanas de todo el mundo (Burke y Moench, 2000; Shah *et al.*, 2007).

En México, en el 2010, alrededor del 37% del volumen total concesionado para usos consumptivos, es decir, usos que consumen el agua en la propia actividad, provienen del agua subterránea (CONAGUA, 2011b). El principal uso agrupado del agua en México, el agrícola —que incluye uso agrícola, acuícola, pecuario, múltiple y otros— tiene un volumen concesionado de alrededor de 61 800 millones de m³/año, de los cuales el 33.8% son extraídos de aguas subterráneas (CONAGUA, 2011a). Por otro lado, a nivel nacional, de los 11 400 millones de m³/año concesionados para uso público urbano y doméstico, el 62.2% proviene de aguas subterráneas (*Ibid.*).

Según la CONAGUA, de los 653 acuíferos de México, 32 estaban sobreexplotados en 1975, es decir, en 32 acuíferos se estaba extrayendo más agua de la que se recargaba (*Ibid.*). En 1985 ya eran 80 acuíferos y al 31 de diciembre del 2009 existían cien acuíferos, de los cuales se extraía el 53.6% del agua subterránea a nivel nacional. Es un hecho preocupante el que más de la mitad del agua subterránea provenga de acuíferos sobreexplotados, pero es aún más alarmante el que según la CONAGUA (2011a), el uso agrupado agrícola de agua subterránea se haya incrementado a 23.2% del 2001 al 2009 y, además, que los usos público urbano y doméstico de agua subterránea hayan crecido 30.3% en el mismo periodo.

La sobreexplotación de los acuíferos lleva al fenómeno de salinización de suelos y la presencia de aguas subterráneas salobres. Según CONAGUA (2011b), para finales del 2010 se habían identifi-

cado 31 acuíferos con presencia de suelos salinos y agua salobre, localizados principalmente en la Península de Baja California y en el altiplano Mexicano. Además, se presentaba intrusión de agua de mar en 18 acuíferos costeros a nivel nacional.

La mayor parte de los acuíferos sobreexplotados o con intrusión salina están ubicados en el norte y centro de México (CONAGUA, 2011a). Esta situación puede ser explicada por la disparidad en la distribución espacial del agua superficial y de la población en el país, como se describe a continuación.

México, localizado entre los 32 y 14° de latitud Norte y 118 y 86° de longitud Oeste, es un país con condiciones de temperatura y precipitación pluvial muy heterogéneas. El territorio mexicano comprende una superficie continental de 1 959 248 km² con un clima predominantemente árido o semiárido en el centro y norte, y sub-húmedo o húmedo en el sur y sureste. Así, mientras al norte, en la frontera con los Estados Unidos la precipitación anual se presenta por debajo de los 500 mm, en el sur-sureste del territorio es posible encontrar valores por encima de los 2 400 mm/año (*Ibid.*).

Además de esta diferencia en aspectos físicos, México tiene considerables disparidades demográficas regionales. La población mexicana, cercana a los 112 millones de habitantes (INEGI, 2010), se ha cuadruplicado en los últimos sesenta años. En las últimas décadas, el mayor crecimiento poblacional y económico se ha producido en las zonas con menor precipitación pluvial. En las regiones áridas o semiáridas del centro y norte de México vive el 77% de la población, con solo el 31% del agua renovable. En contraste, el sur y sureste de México tiene el 69% del agua renovable, con solo el 23% de la población nacional (*Ibid.*).

Estas asimetrías producen una presión geográficamente diferenciada en las aguas subterráneas, y explican un problema que es más notorio en el centro-norte de México (Marín, 2002). De los cien acuíferos ya sobreexplotados a nivel nacional para el 2009, 72 se ubican en las entidades federativas de Sonora, Chihuahua, Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Durango, Nuevo León, Guanajuato, Puebla, San Luis Potosí, Zacatecas, Estado de México y Querétaro (CONAGUA, 2011b).

Estas entidades se localizan en el centro-norte de México y en términos geográficos corresponden con buena parte de las zonas áridas y semiáridas del país. En las regiones donde la disponibilidad de agua superficial es baja, los acuíferos representan un papel fundamental, pues a veces son la única fuente de agua para el consumo humano y el desarrollo de actividades económicas.

En México, el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) es el encargado de inscribir los derechos de agua según le encomienda la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su reglamento. Aunque la LAN fue promulgada en 1992, no fue sino hasta recientemente que el REPGA llegó a ser una base de datos confiable (Garduño, 2005).

El REPGA contiene información básica para entender el uso del agua subterránea en México. En este registro se indica, para cada derecho de agua, el volumen concesionado, la ubicación geográfica, los usos y la profundidad de perforación, entre otros datos. Éstos aportan una idea de la presión que se ejerce sobre los acuíferos en las distintas regiones del país, entendida como una presión de carácter antropogénico o aquella que se genera por los usos del agua en cualquier tipo de actividad humana: agricultura, industria, ganadería, doméstico, entre otras, y no solo por el consumo humano directo.

Los datos del REPGA pueden utilizarse como indicadores ambientales de presión en la implementación del modelo Presión-Estado-Respuesta (PER), (OCDE, 1993), el marco metodológico-conceptual más utilizado en México para el diseño de políticas ambientales (SEMARNAT, 2008). El PER requiere como variables descriptoras de *presión*, parámetros que cuantifiquen el uso sobre los distintos elementos del ambiente y, en el caso del REPGA, algunos de sus parámetros describen la presión antropogénica sobre el agua subterránea.

Un indicador ambiental constituye un parámetro de fácil comprensión que describe la integridad ambiental o la condición de presión o deterioro de un elemento del ambiente (agua, aire, suelo), (Smeets y Weterings, 1999), y en el esquema conceptual del PER los indicadores de presión deben describir de forma inequívoca las presiones antropogénicas sobre dicho elemento

(OECD, 1993). Así, si se toma como referente el agua subterránea, el REPDA contiene indicadores de presión como son el volumen concesionado y la profundidad de perforación.

El volumen concesionado, expresado en m³/año, es un buen ejemplo de una dimensión de la presión sobre el acuífero, pues se vincula con la demanda que se ejerce sobre los recursos hídricos del subsuelo. La profundidad de perforación, expresada en metros, también es un claro indicador de la presión ejercida sobre los acuíferos. Como se ha visto en diversos estudios, las mayores profundidades de extracción usualmente se localizan donde el registro de los niveles estáticos indica conos de abatimiento más pronunciados (p. ej., Ávila y Garduño, 2007; Gutiérrez *et al.*, 2002; Núñez y Robles, 2008). En condiciones de abatimiento evidente, por ejemplo, productores agropecuarios u organismos operadores municipales de agua perforan pozos más profundos, para obtener ventajas de extracción sobre otros productores con menos capacidad económica para sobre-equiparse (Díaz, 2012).

Es importante enfatizar que estos dos parámetros son indicadores de presión y no de estado o de respuesta. El *estado* de los acuíferos, que se vincula con su grado de afectación por estar sometidos a esta presión, constituye otra dimensión del problema y depende en gran medida de las condiciones hidrogeológicas particulares (tipo de sustrato, permeabilidad, tasa de recarga, entre otras), que pueden medirse con indicadores específicos que aporten una idea del estado que tiene cada acuífero (por ejemplo, grado de intrusión salina y grado de contaminación con metales pesados). En este sentido, se requeriría de diagnósticos particulares en cada región para conocer el estado específico de cada acuífero; sin embargo, se considera que estudiar los indicadores aquí propuestos es un buen inicio para poner en perspectiva espacial, a nivel nacional, la diferenciación geográfica que existe en términos de la presión de las actividades humanas sobre el agua subterránea.

De esta forma, presión y estado constituyen componentes distintos de un mismo fenómeno, y al tiempo que deben medirse con indicadores distintos, deben considerarse simultáneamente para definir acciones de *respuesta* de la sociedad

que aborden integralmente la problemática ambiental.

Tomando como referencia la utilidad que puede tener el REPDA para alimentar el modelo PER descrito anteriormente, y aprovechando las ventajas analíticas de los modelos espaciales, este estudio busca conocer las regiones con mayor presión sobre las aguas subterráneas en México.

DATOS Y MÉTODOS

Los datos base para este estudio fueron los 314 292 derechos de agua que se localizan dentro de los límites continentales de México según CONAGUA. Estos datos estaban actualizados a septiembre de 2009. La compilación de estos datos se realizó de la siguiente forma: primero se descargaron los derechos de agua por entidad federativa, en archivos en formato *Keyhole Markup Language* (KML) de la página oficial de CONAGUA (CONAGUA, 2010). Estos datos fueron convertidos a archivos en formato *Database* (DBF) por medio del programa Excel XP®. Aprovechando que esta información tiene la ubicación geográfica, expresada en longitud y latitud, cada derecho fue localizado en forma de registro puntual usando ArcMap®, eliminando los registros que por errores en sus coordenadas se localizaron fuera de la superficie continental del país. La generación de los modelos espaciales se realizó mediante el método de cálculo de densidad de tipo Kernel, el cual consiste en la conversión de puntos, en este caso los derechos de agua, a superficies continuas con base en los valores de atributos como, por ejemplo, el volumen concesionado para cada derecho (Baxter y Beardah, 1997). Esta transformación permitió crear áreas de densidad de uso del agua y visualizar las regiones clasificadas según un nivel alto, medio o bajo de densidad.

Para el cálculo de las superficies, el método de Kernel calcula la densidad de observaciones alrededor de un pixel. ArcGIS® usa una función cuadrática de tipo Kernel (Silverman, 1986:76), como se muestra a continuación:

$$D(s) = \sum_{i=1}^n S_i (3/\pi\tau^2) [1 - (h_i^2/\tau^2)]^2 \quad (1)$$

En donde τ es el radio del círculo de los puntos vecinos, h_i es la distancia entre el punto s y el punto observado S_i , n es el número de puntos observados y $D(s)$ es la densidad en ese punto.

Una de las ventajas de usar los mapas de densidad de tipo Kernel es la posibilidad de comparar los resultados en términos geográficos tomando en cuenta solamente la cantidad de puntos, es decir, sin peso o atributo, o bien considerando el valor de ciertos atributos, como en este estudio: el volumen concesionado y la profundidad de perforación. Así, se analizó primero una superficie de densidad sin ningún atributo o peso, es decir, tomando solamente la cantidad y localización de los derechos; después se analizaron las superficies de densidad con los dos atributos mencionados anteriormente.

El cálculo de las superficies de densidad para la identificación de las regiones con mayor presión sobre el agua subterránea se realizó con una resolución espacial de un kilómetro. En el método de Kernel la selección del radio de búsqueda de puntos vecinos depende de la desviación estándar de los píxeles. Una desviación estándar alta permite observar regiones con mucha densidad pero poca extensión, mientras que una desviación estándar baja muestra lo contrario. La desviación estándar más conveniente, y en consecuencia el radio adecuado, se considera cuando a diversos radios, la desviación estándar comienza a ser constante, lo cual en los casos analizados ocurrió con un radio de 50 km. En suma, la selección del radio no se realizó con base en una característica física del territorio, sino que dependió del comportamiento de la desviación estándar así como de la mejor forma de visualizar el mapa en relación con la escala utilizada.

Las superficies de densidad obtenidas a partir de cada uno de los indicadores (cantidad, volumen concesionado y profundidad de perforación de los pozos) fueron reclasificadas usando el método de *Jenks*,¹ también conocido como inter-

¹ *Jenks* es un método de clasificación recomendado cuando no existe una distribución normal de los datos, como es el caso en las variables usadas en este estudio. Bajo este método, los datos se subdividen en varias clases, con límites de clase que permiten minimizar la varianza al interior de éstas, y maximizar la varianza entre clases distintas.

valos naturales, en una escala ordinal del 1 al 9 y posteriormente, para una mejor geovisualización, agrupados en tres conjuntos: alta (1-3), media (4-6), baja (7-9). El resultado de estos cálculos se muestra en las Figuras 1, 2 y 3. Posteriormente, los tres indicadores, en sus valores ordinales del 1 al 9, se combinaron mediante el método de combinación lineal ponderada (*weighted linear combination*) con el mismo coeficiente de ponderación (1/3), (Jankowski, 1995; Barredo, 1996; Malczewski, 2006), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad resultante} = (\text{cantidad} + \text{volumen} + \text{profundidad})/3 \quad (2)$$

Al igual que en las Figuras 1, 2 y 3, la superficie resultante de este cálculo se reclasificó en alta, media y baja presión como se observa en la Figura 4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los principales usos de agua reconocidos en el REPDA incluyen público urbano, industrial, doméstico, agrícola, agroindustrial, acuícola, pecuario, generación eléctrica, comercio y servicios. Además, existen otras clasificaciones no especificadas como múltiples usos, otros y fuera de uso. La cantidad de derechos de agua y el volumen concesionado según el uso del agua se muestra en la Tabla 1.

De los 314 292 derechos de agua, el 76% del volumen concesionado es extraído para fines agrícolas, 16% para uso público urbano y 5.2% para uso industrial. La mayor parte de los pozos están repartidos entre agrícola y uso público urbano.

Como se describió anteriormente, el resultado de los mapas de densidad de Kernel fue reclasificado en una escala ordinal (1-9) y posteriormente agrupado en tres conjuntos: alta, media y baja. Usando este método, los resultados para la densidad según la cantidad de pozos, sin atributo, se puede observar en la Figura 1.

La Figura 1, que analiza las áreas de mayor presión de acuerdo con la cantidad de pozos sin considerar ningún otro atributo, muestra un panorama diferente a lo descrito en la introducción

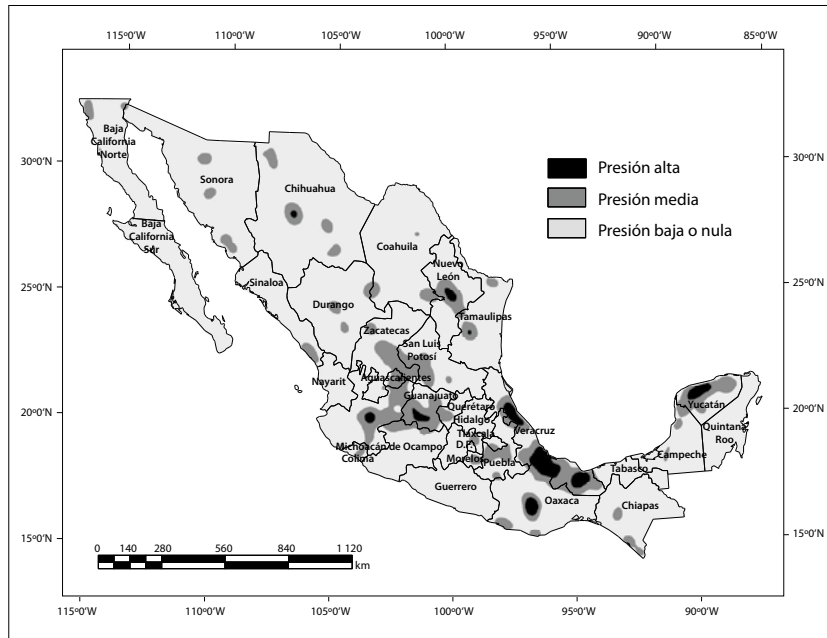


Figura 1. Áreas de presión antropogénica sobre el agua según la cantidad de los pozos registrados en el REPDA.

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2010).

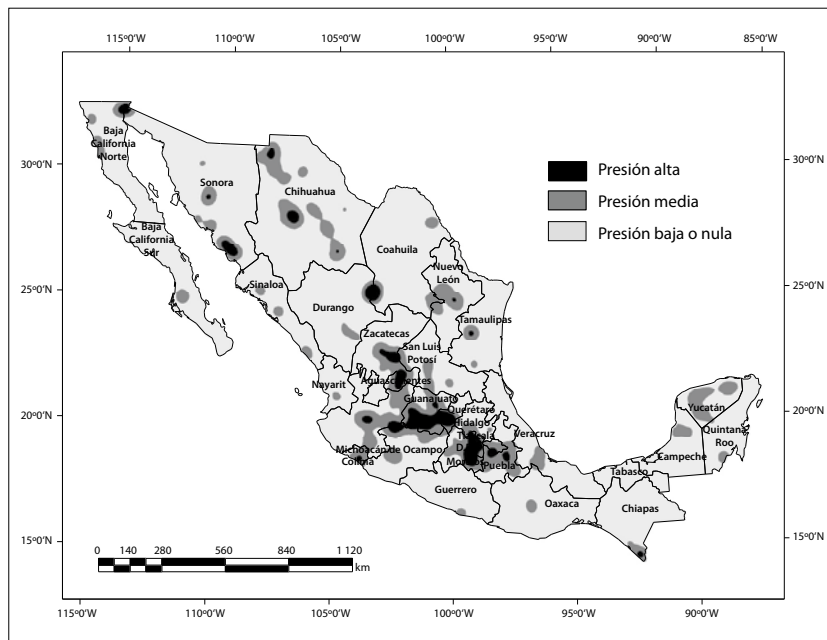


Figura 2. Áreas de presión antropogénica sobre el agua según el volumen concesionado de los pozos registrados en el REPDA.

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2010).

de este estudio, en la que se señala al norte y centro de México como las regiones de mayor uso de agua subterránea. Como se puede observar, diversas regiones, principalmente de Veracruz, Oaxaca y Yucatán es donde existe una alta presión.

Utilizando el método expuesto anteriormente, pero analizando ahora el atributo de volumen

concesionado, se obtuvo la superficie de densidad que se muestra en la Figura 2.

La Figura 2 corresponde más a la afirmación de que en el norte y centro del país, con mayor población pero menos agua superficial, se hace más uso del agua subterránea. Como se puede observar, es precisamente en estas regiones donde se ubican

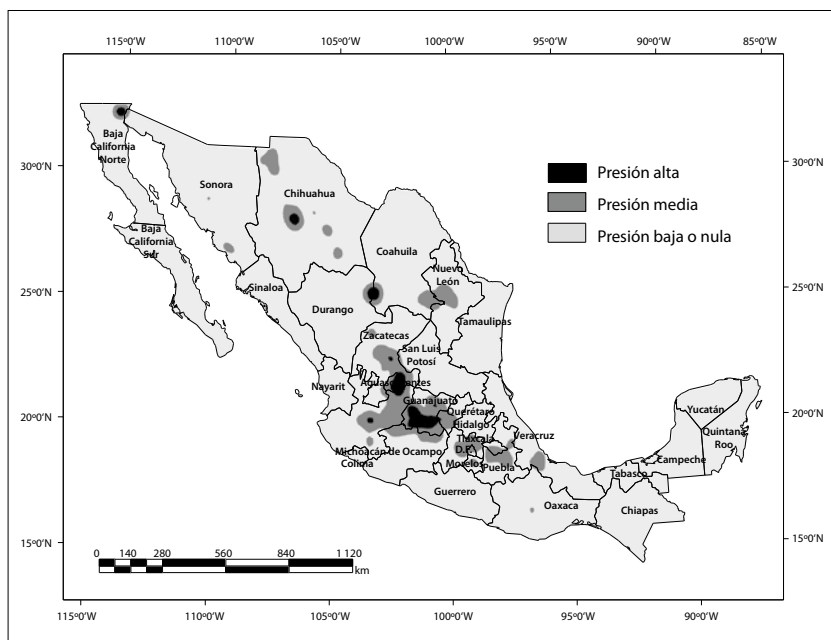


Figura 3. Áreas de presión antropogénica sobre el agua según la profundidad de perforación de los pozos registrados en el REPDA.

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2010).

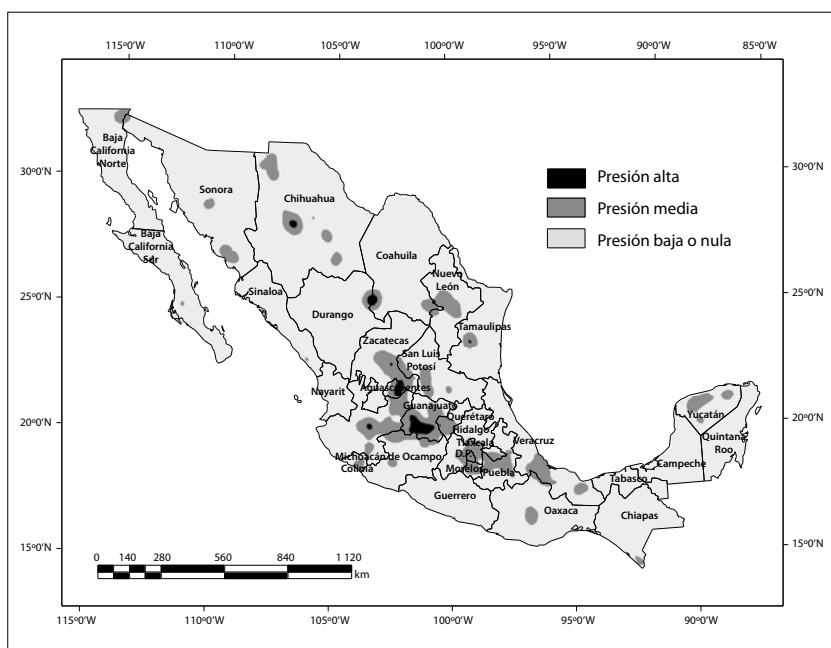


Figura 4. Áreas de presión antropogénica total combinada sobre el agua subterránea en México.

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2010).

las áreas de mayor presión según el atributo de volumen concesionado.

En lo que respecta al atributo de profundidad de perforación, las áreas de presión se distribuyen como se muestra en la Figura 3.

De forma similar a los resultados del atributo de volumen, cuando se utiliza el atributo de pro-

fundidad de perforación, las áreas de mayor presión se ubican en el norte y centro del país, aunque de forma más pronunciada que en la Figura 2, lo que hace desaparecer algunas áreas de presión media y alta, sobre todo en el noroeste del país.

Finalmente, usando el método de combinación lineal ponderada, con el mismo peso para cada uno

Tabla 1. Cantidad de derechos y volumen concesionado según el uso del agua del total de derechos de agua subterránea

Tipos de usos	Cantidad de derechos	Volumen concesionado (m ³)	Porcentaje del total concesionado (%)
Público Urbano	105 444	3 314 666 483	16.1
Doméstico	18 533	40 316 572	0.2
Industrial	6 033	1 072 342 869	5.2
Acuícola	179	14 565 975	0.1
Agrícola	145 641	15 696 742 054	76.0
Agroindustrial	78	5 154 296	0.0
Comercio	2	1 259	0.0
Generación eléctrica	4	778 857	0.0
Pecuario	29 525	171 455 826	0.8
Servicios	5 811	188 696 115	0.9
No especificado	3 042	136 028 282	0.7
Total	314 292	20 640 748 588	100.0

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2010).

de los tres indicadores, se muestran en la Figura 4 las áreas con alta, media y baja presión antropogénica total combinada.

Este análisis exploratorio de datos espaciales muestra importantes características de la distribución de los derechos de aguas subterráneas. Como se observa en la Figura 4, las áreas con más alta presión se distribuyen a lo largo del territorio mexicano. Sin embargo, todas las figuras indican una presión total muy fuerte en la región del Bajío, la Comarca Lagunera y el centro-oeste de Chihuahua (color negro en la Figura 4).

La combinación de la cantidad, el volumen concesionado y la profundidad de perforación de los pozos puede dar cuenta de la presión y el estado del recurso hídrico subterráneo. Para comprobar si esta información es útil en este sentido, se sobrepuso la superficie de densidad de la Figura 4 con el

mapa de los acuíferos sobreexplotados en 2009 según CONAGUA (2011a). De esta sobreposición se determinó cuáles acuíferos sobreexplotados se intersectan con las áreas de presión antropogénica alta y media sobre el agua subterránea, como se muestra en la Figura 5.

Como se puede observar en la Figura 5, las áreas de color negro corresponden a la intersección de alta-media presión antropogénica y a los acuíferos sobreexplotados. Estas áreas se ubican básicamente en el centro y norte de país, lo que coincide con la distribución geográfica del agua y la población. Como se mencionó en la introducción, las regiones áridas del centro y norte de México concentran el 77% de la población con solo el 31% del agua dulce total disponible en todo el país. Por otro lado, el sur-sureste de México tiene el 69% del agua disponible, con solo el 23% de la población nacional (CONAGUA, 2011a).

En la Figura 5, adicionalmente, se presenta un dato muy importante para la apropiada gestión del agua y que se considera como una de las contribuciones principales de esta investigación. En color gris se indican las áreas con presión alta-media que no corresponden a acuíferos sobreexplotados. Como se mencionó, la cantidad, la profundidad y el volumen de los pozos guardan una relación inequívoca con la presión sobre el acuífero. Los acuíferos que están en color gris no están sobreexplotados actualmente, sin embargo, estas áreas están expuestas a una presión antropogénica que podría cambiar esta situación. La metodología expuesta en este estudio permite visualizar las áreas que están en riesgo de sobreexplotación debido a un aumento de la presión antropogénica sobre el recurso hídrico, o bien bajo riesgo si las condiciones de recarga se modifican. Así, las zonas donde se debe revisar el consumo de agua subterránea ya no solo se ubican en el norte y centro de México como en el mapa de acuíferos sobreexplotados, sino también en diversas áreas de Veracruz, Oaxaca y Yucatán.

Adicionalmente, es bien sabido que los acuíferos mexicanos han sido objeto de pocos estudios del balance hídrico (Carabias y Landa, 2005). En este sentido, estudios como el propuesto en este artículo, basados en la presión de la extracción de agua subterránea, proporcionan una forma expedita de

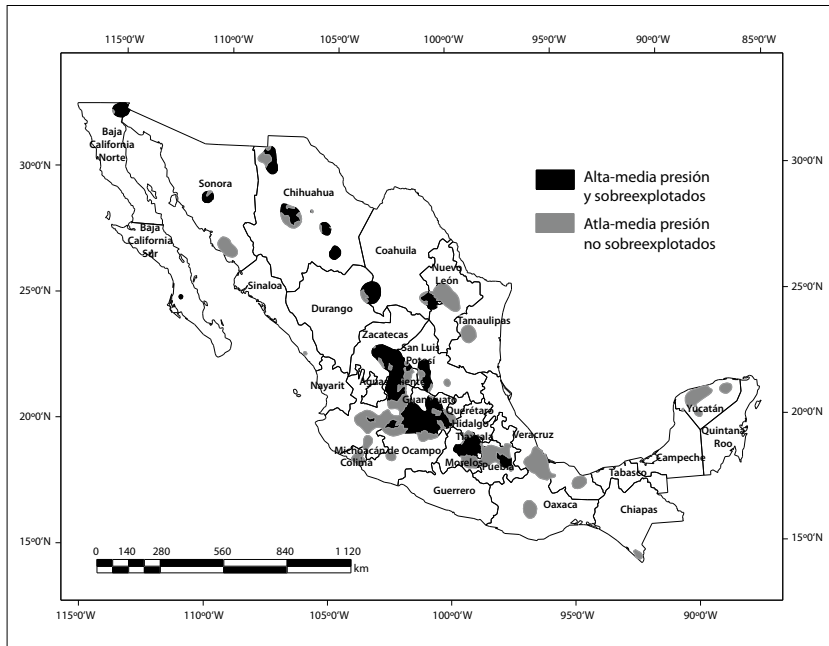


Figura 5. Sobreposición de presión antropogénica y acuíferos sobreexplotados.

Fuente: elaboración propia con base en CONAGUA (2010; 2011a).

obtener información sobre la situación del agua. Como ha sido reportado por estudiosos en el tema, el uso intensivo de las aguas subterráneas puede proporcionar por sí mismo una buena explicación de la sustentabilidad de los acuíferos (Scott *et al.*, 2010).

Finalmente, aunque el REPDA ha llegado a ser una base de datos confiable (Garduño, 2005), el hecho de que 4 088 derechos de agua resultaron georreferenciados fuera de los límites continentales de México, deja ver la necesidad de seguir depurando y mejorando la base de datos para generar información geográfica cada vez más exacta.

CONCLUSIONES

Los datos analizados del REPDA pueden utilizarse como insumos de entrada para generar una cartografía de la presión sobre el agua subterránea en México, especialmente si se requiere de datos que sean comparables en su naturaleza y en su forma de medirse a nivel nacional. Estos datos no indican por sí solos el estado de los acuíferos, pero constituyen un referente obligado para entender su condición actual y su posible evolución en el tiempo. Des-

de esta perspectiva, representan indicadores que facilitan la definición de acciones encaminadas a lograr la sustentabilidad de los acuíferos, especialmente si se analizan en conjunto con información que indique el estado de éstos. En este sentido, la combinación de la cantidad de pozos, volumen concesionado y profundidad de perforación, ayudan a definir las zonas con alta presión, que aunque todavía no tengan el estatus de sobreexplotadas, es posible presenten esta situación en el futuro.

Los resultados de este trabajo muestran que existen áreas, no solamente en el centro y norte del país, donde es necesario revisar la extracción de agua subterránea. Esta respuesta debe ser más urgente ante condiciones de estiaje, como las que han ocurrido en los últimos años.

El método propuesto para identificar el grado de presión sobre las aguas subterráneas permite desagregar la presión en componentes simples, o bien integrar un indicador agregado a partir de los ejes que lo componen. Aquí radica una ventaja adicional para los tomadores de decisiones, pues en términos de gestión del agua subterránea, el método facilita definir acciones específicas, encaminadas a reducir la presión antropogénica global, como por ejemplo, disminuir la cantidad de pozos

concesionados por unidad de área, disminuir la profundidad máxima permisible de las nuevas concesiones o disminuir el volumen de extracción.

A partir del ensayo y modelaje de las variables anteriores, se pueden visualizar geográficamente las nuevas condiciones de presión, y también elucidar de qué forma estas condiciones de presión generan diferentes estados en contextos hidrogeológicos específicos. Las diferencias regionales serían una base adecuada para elaborar políticas de manejo de acuíferos geográficamente diferenciadas.

Este estudio es una primera aproximación para obtener un conocimiento detallado de los patrones de consumo de agua. Constituye un ejercicio que se puede actualizar con facilidad, incorporando bases de datos periódicamente actualizadas del REPDA. Futuras investigaciones podrían explorar otras variables, por ejemplo, socioeconómicas y demográficas, para explicar por qué los grados más altos de presión sobre el agua subterránea se producen en ciertos sitios.

REFERENCIAS

- Ávila, J. A. y V. H. Garduño (2007), "Análisis del abatimiento de los niveles freáticos del sistema acuífero de Morelia", *Ciencia Nicolaita*, núm. 46, pp. 105-122.
- Barredo, J. I. (1996), *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*, Ra-Ma, Madrid.
- Baxter, M. J. and C. C. Beardah (1997), "Some archaeological applications of kernel density estimates", *Journal of Archaeological Science*, no. 24, pp. 347-354.
- Burke, J. and M. Moench (2000), *Groundwater and Society: resources, tensions and opportunities*, Naciones Unidas, New York.
- Carabias, J. y R. Landa (2005), *Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*, UNAM, El Colegio de México, Fundación Gonzalo Río Arronte, México.
- CONAGUA (2010), *Registro Público de Derechos de Agua*, recuperado el 15 de octubre de 2010 [www.conagua.gob.mx].
- CONAGUA (2011a), *Estadísticas del Agua en México*, Comisión Nacional del Agua, recuperado el 27 de noviembre de 2011 [www.conagua.gob.mx].
- CONAGUA (2011b), *Atlas del Agua en México*, SEMARNAT-Gobierno Federal, México.
- Cosgrove, W. J. and F. R. Rijsberman (2000), *World Water Vision: Making Water Everybody's Business*, Earthscan Publications Ltd.
- Díaz Caravantes, R. E. (2012), "Balancing urban and peri-urban exchange: water geography of rural livelihoods in Mexico", *The Geographical Journal*, vol. 178, no. 1, pp. 42-53.
- Díaz Caravantes, R. E. and C. A. Scott (2010), "Water management and biodiversity conservation interface in Mexico: a geographical analysis", *Applied Geography*, vol. 30, no. 3, pp. 343-354.
- Garduño, H. (2005), "Lessons from implementing water rights in Mexico", in Bruns, B., C. Ringer and R. Meinzen-Dick, *Water Rights Reform: Water Rights Reform: Lessons for Institutional Design*, International Food Policy Research Institute, Washington D.C., pp. 85-112.
- Giordano, M. and K.G. Villholth (2007), "The agricultural groundwater revolution: setting the stage", in Giordano, M. and K. G. Villholth, *The agricultural groundwater revolution: Opportunities and threats to development*, Cromwell Press, International Water Management Institute, UK, pp. 1-4.
- Gutiérrez Carrillo, N., E. Palacios Vélez, S. Peña Díaz y O. L. Palacios Vélez (2002), "Escenarios para el aprovechamiento sustentable del acuífero del valle de Querétaro", *Agrociencia*, núm. 36, pp. 1-10.
- INEGI (2010), *XII Censo General de Población y Vivienda*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- Jankowski, P. (1995), "Integrating geographical information systems and multiple criteria decision making methods", *International Journal of Geographic Information Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 251-273.
- OCDE (1993), *Core Set of Indicators for Environmental Performance Reviews*, OCDE Environment Monographs 83.
- Oki, T. and S. Kanae (2006), "Global hydrological cycles and world water resources", *Science*, 313 (5790), pp. 1068-1072.
- Marín, L. E. (2002), "Perspectives on Mexican Ground Water Resources", *Groundwater*, vol. 40, no. 6, pp. 570-571.
- Malczewski, J. (2006), "Integrating multicriteria analysis and geographic information systems: The ordered weighted averaging approach", *International Journal of Environment Technology and Management*, vol. 6, no. 1-2, pp. 7-19.
- Núñez, E. P. y H. Robles (2008), "Actualización de las redes piezométricas del acuífero Chupaderos, estado de Zacatecas", *Investigación Científica*, vol. 4, núm. 2, pp. 1-11.

- Scott, C. A., S. Dall'erba and R. E. Díaz Caravantes (2010), "Groundwater rights in Mexican agriculture: spatial distribution and social and economic determinants", *The Professional Geographer*, vol. 62, no. 1, pp. 1-15.
- SEMARNAT (2008), *Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México*, Gobierno Federal, México.
- Shah, T., J. Burke and K. G. Villholth (2007), "Groundwater: a global assessment of scale and significance", in Molden, D. (ed.), *Water for Food, Water for Life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*, Earthscan, y Colombo:, International Water Management Institute, London, pp. 395-423.
- Silverman, B.W. (1986), *Density estimation for statistics and data analysis*, Chapman and Hall, New York.
- Shiklomanov, I. (1998), *World water resources: Modern assessment and outlook for 21st century*, Federal Service of Rusia for Hydrometeorology & Environment Monitoring State, Hydrological Institute, San Petesburgo.
- Smeets, E. and R. Weterings (1999), *Environmental indicators: typology and overview*, European Environment Agency, Copenhagen, Belgium, Technical Report 25.
- Struckmeier, M., Y. Rubin and J. A. Jones (2005), *Groundwater-reservoir for a thirsty planet?* Planet Earth, International Union of Geological Sciences y United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation.