

LOS ACUÍFEROS DE LAS ISLAS DE BARRERA DE YUCATÁN, EL CASO DEL PUERTO DE SISAL

ALEJANDRO MEDINA, ROGER PACHECO,
ROGER GONZÁLEZ, CÉSAR CANUL-MACARIO

El agua subterránea en la costa de Yucatán

La geología superficial de la Península de Yucatán está formada, en su mayoría, por rocas calizas de alta permeabilidad que afloran y dan lugar a un relieve predominantemente plano. Debido a lo anterior, los cuerpos de agua superficiales son escasos y el agua de lluvia se infiltra rápidamente dando lugar a un vasto acuífero cárstico con bajo gradiente hidráulico en dirección a las costas (Perry *et al.*, 2010).

En la costa norte de Yucatán se tiene un sistema hidrogeológico característico, el cual se debe a la presencia de una capa de calizas impermeables que confina al acuífero regional, sobre la cual descansan las islas de barrera conformadas por arenas que contienen acuíferos colgados y libres *(Perry *et al.*, 2003) (Figura 2).

- Los acuíferos colgados son acuíferos que se encuentran entre el nivel del terreno natural y el nivel del agua de un acuífero más profundo y extenso. Los acuíferos libres son aquellos que están expuestos directamente a la presión atmosférica; es decir, que no los confina ninguna capa de suelo sobreyacente. En el caso del que se habla, estos se encuentran entre el nivel del terreno y una capa que confina al acuífero profundo y regional del estado

La falta de estudios de los acuíferos de las islas de barrera en la zona dificulta su análisis y entendimiento. En la actualidad, sólo se tiene registro de dos estudios similares entre sí. En el primero realizado por Batllori *et al.* (1993), en la Reserva Estatal del Palmar, se registró la carga hidráulica en la zona de playa y se observó una rápida atenuación de la marea, concluyendo que el acuífero es de tipo libre. En el segundo estudio llevado a cabo por Medina (2020) en la zona poniente de Sisal, Yucatán, se monitoreó la carga hidráulica en dos pozos ubicados en la primera duna alineados perpendicularmente en dirección a la costa. Los resultados coinciden con la presencia de un acuífero libre cuyo gradiente hidráulico está en dirección al mar. Además, se estimó la conductividad hidráulica en 2.0 md^{-1} , el almacenamiento en 0.04 y la recarga en 20% de la precipitación.



Figura 1. Isla de Barrera de Sisal, Yucatán. Al norte el Golfo de México, al sur una laguna costera

Disponibilidad de agua dulce en la costa

Debido a las características hidrológicas de la Península, los ecosistemas y asentamientos humanos dependen casi en su totalidad del agua subterránea, lo cual, no es un problema en la porción continental donde el acuífero se encuentra bien recargado por la precipitación. En la costa noroeste de Yucatán la presencia de dos tipos de acuíferos (Figura 2) sugiere buena disponibilidad de agua dulce; sin embargo, ambos acuíferos tienen problemáticas y vulnerabilidades que afectan su disponibilidad de agua dulce. Para ambos casos la principal amenaza es la intrusión salina. En los acuíferos de las islas de barrera la vulnerabilidad a la salinización aumenta debido a la presencia del mar y a las lagunas costeras en sus fronteras. Por otro lado, el confinamiento del acuífero regional facilita el flujo de agua marina hacia el continente (Canul-Macario, 2020).

Hasta hace aproximadamente veinte años, la mayoría de los asentamientos costeros de Yucatán se abastecían de agua dulce extraída de los acuíferos de las islas de barrera mediante pozos someros. El agua de estos pozos constituye el abastecimiento de las construcciones más antiguas; mientras que, en las edificaciones recientes, se utiliza para el llenado de piscinas o riego. Desgraciadamente, algunos pozos antiguos han sido utilizados como sumideros de aguas residuales que son dispuestas sin tratamiento alguno y otros clausurados ante la imposibilidad de su uso para abastecimiento (Herrera-Silveira *et al.*, 2004).

En la actualidad, el crecimiento demográfico en la costa y de servicios turísticos ha traído consigo diversas

problemáticas hidrológicas asociadas a la urbanización (Herrera-Silveira *et al.*, 2004). La primera de ellas corresponde al aumento en la demanda de agua para consumo humano, lo que causa la reducción del espesor de la capa de agua dulce en estos acuíferos de pequeño volumen. La segunda se debe al aumento del caudal de aguas residuales que, como se mencionó anteriormente, se disponen sin tratamiento. La tercera problemática es la modificación en el régimen de infiltración de agua de lluvia, por tanto, de la recarga, debido al aumento en la urbanización que trae consigo la impermeabilización causada por la construcción de edificios y calles carentes de planeación hidrológica local. Finalmente, se encuentran el cambio climático que afecta a los regímenes de precipitación y el aumento en el nivel del mar que trae consigo intrusión marina.

Para discutir las afectaciones a nivel hidrogeológico en dichos acuíferos se asume un modelo conceptual ideal donde el acuífero es somero y tiene: a) un domo de recarga al centro causado por la precipitación local; b) dos fronteras salinas de carga hidráulica variable al norte y al sur (mar y laguna costera) y c) dos fronteras de flujo nulo en direcciones este-oeste (Figuras 2 y 3).

Este modelo conceptual sugiere que el aumento en la extracción de agua dulce y la disminución de la recarga reducen la carga hidráulica y el espesor de la capa de agua dulce. Si se le añade el aumento del nivel medio del mar, se intensificará la intrusión marina y se reducirá dramáticamente la capa de agua dulce. Finalmente, la disposición de aguas residuales degradará la calidad del agua en todo el espesor del acuífero.

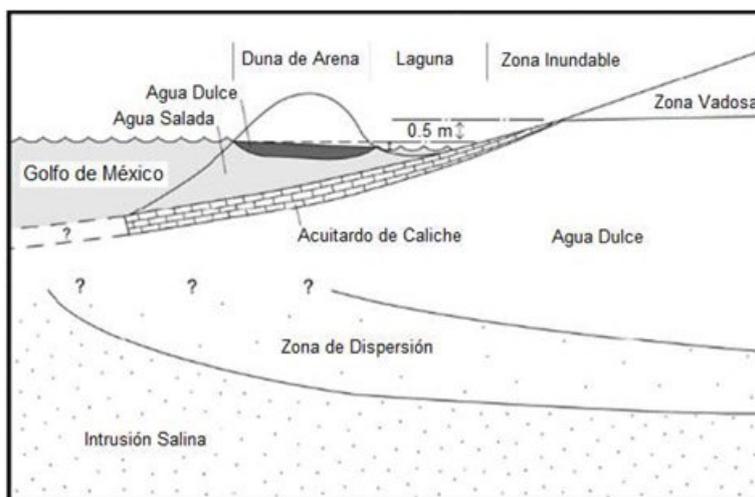


Figura 2. Hidrogeología de la costa noroeste de Yucatán. Modificada de Perry *et al.* (2003)

¿Cómo se pretende atender el problema?

Con la finalidad de describir el flujo de las aguas subterráneas en la isla de barrera de Sisal, Yucatán, se llevó a cabo el monitoreo de la carga hidráulica y la modelación numérica del acuífero de la isla de barrera de Sisal, Yucatán (Figura 1) mediante el código SEAWAT (Guo y Langevin, 2002). El objetivo de esta modelación consiste en conocer las direcciones de flujo del agua subterránea, así como la interacción de éste con la recarga local, con las variaciones de los niveles del mar y las lagunas costeras.

La campaña de monitoreo requirió la instalación de seis sensores de presión U20L HOBO® programados para muestrear a una frecuencia de diez minutos; cinco de estos sensores se instalaron en pozos distribuidos a lo largo de la zona poblada de la isla de barrera para monitorear el nivel freático. El sexto sensor monitoreó la carga hidráulica en la laguna costera. Además, se realizaron *slug-tests* en los pozos P1a y P1b para realizar una estimación inicial de la conductividad hidráulica.

El dominio del modelo abarca la zona cubierta por los pozos y se encuentra limitado por a) el Golfo de México al norte donde la condición de frontera es el nivel del mar; b) la laguna costera de Sisal al sur con el nivel de la misma como condición de frontera; c) el canal de acceso al puerto de abrigo que comparte condición de frontera con el Golfo de México, esta frontera se encuentra al oeste y suroeste y d) al este por el eje perpendicular a la costa que pasa sobre el pozo P5 cuya frontera es de flujo nulo (Figura 3).

Los sensores registraron la presión absoluta, por lo que se compensaron por presión barométrica, cuya serie de tiempo se obtuvo de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM. De la misma fuente se obtuvo la serie de tiempo de precipitación que fue utilizada para el análisis de la recarga.

Los resultados del monitoreo (Figura 4) señalan que el

acuífero es de tipo libre y somero. Esto se observa en las oscilaciones de la carga hidráulica de los pozos P1 y P5 que son los más cercanos a la costa, cuyas amplitudes de marea equivalen apenas a 10% de la marea astronómica. Mientras que en los pozos P2, P3 y P4, el efecto de la marea astronómica es prácticamente imperceptible. El efecto de la marea meteorológica tuvo influencia a largo plazo en la carga hidráulica de todos los pozos. De acuerdo con lo anterior, se deduce que el acuífero está directamente influenciado por las variaciones periódicas del nivel del mar en la zona de playa y por la marea meteorológica en toda su extensión, por tanto, se considera altamente vulnerable a la intrusión salina y a fenómenos hidrometeorológicos intensos como los huracanes y los frentes fríos.

Por otra parte, se observa que el acuífero responde eficientemente a los eventos de recarga individuales y que su nivel se recupera rápidamente para eventos de recarga de largo plazo. Para los eventos de recarga individuales se determinó un tiempo de respuesta medio de treinta minutos y el periodo de recuperación de una semana. Estos resultados indican una recarga media de 53% de la precipitación, la cual, es mayor a la tasa de recarga del acuífero cárstico de la Península de Yucatán (Rodríguez-Huerta, 2020). Debido a que, en la costa noroeste de Yucatán la precipitación media anual es de 511 mm (INEGI, 2002), la tasa de recarga sugiere que el acuífero de la isla de barrera de Sisal cuenta con buena capacidad de infiltración. Sin embargo, la influencia del mar y la cercanía inmediata con la laguna costera comprometen la disponibilidad de agua dulce en el acuífero.

La conductividad hidráulica media estimada en los *slug-test* resultó en 5.33 md^{-1} , lo que indica la presencia de limos y arcillas en el acuífero. Este parámetro se utilizó para correr un modelo en estado estacionario (Figura 3), con el cual, se definieron adecuadamente las condiciones de frontera. El modelo indica que los domos* de recarga se ubican al centro y que el flujo es en



Figura 3. Modelo estacionario. Los contornos están separados a cada 0.10 m

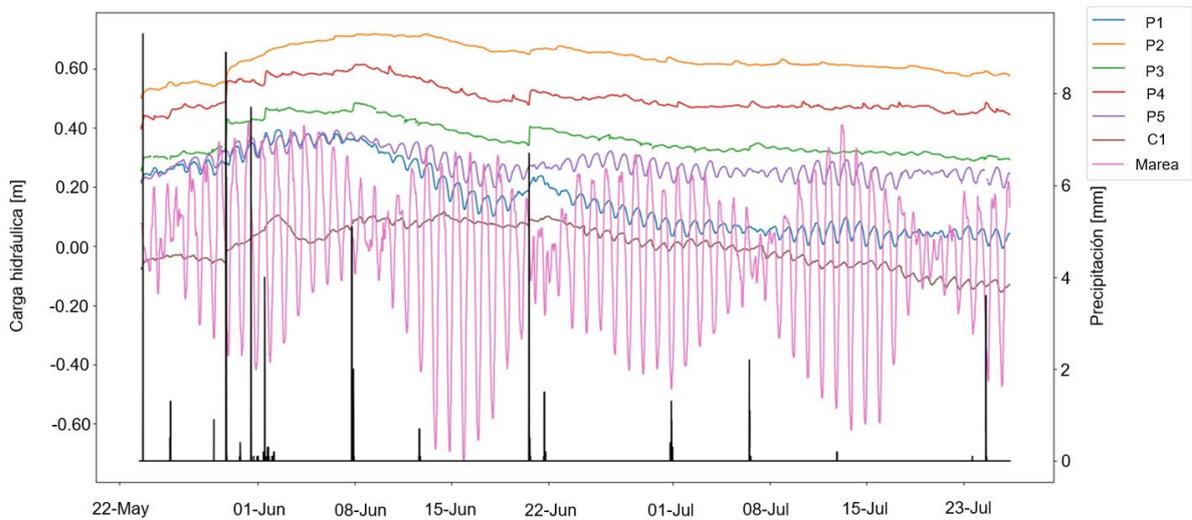


Figura 4. Series de tiempo en los pozos, las fronteras y de la precipitación

dirección al mar y a las lagunas costeras. Los gradientes hidráulicos resultaron entre 1.6×10^{-3} y 3.3×10^{-3} m/m, encontrándose los más fuertes en dirección al mar; estos resultados y su variación se asocia a la geomorfología de la isla de barrera.

- Domo de recarga: Es una zona donde el nivel del acuífero es muy alto y se debe a que la recarga ocurre en esa zona.

En conclusión, la isla de barrera de Sisal tiene un acuífero con buena capacidad de infiltración, lo que permite la rápida captación del agua de lluvia. Sin embargo, la influencia del mar y la laguna costera comprometen la cantidad de agua dulce que pueda contener. Además, al ser un acuífero somero resulta

vulnerable a la contaminación causada por los asentamientos y actividades humanas. En los acuíferos someros el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie del terreno.

Este trabajo se complementará con un modelo transitorio que pretende describir la hidrodinámica de este acuífero. Actualmente, se encuentra en proceso de desarrollo y es de los primeros en su especie en la Península de Yucatán que atiende las particularidades de los acuíferos de isla de barrera en la región, mismos que son importantes, ya que las poblaciones costeras dependen de sistemas de bombeo de agua dulce desde zonas a varios kilómetros tierra adentro; por lo que entender estos acuíferos revelará su potencial como fuente alterna de abastecimiento de agua dulce.

Referencias

- Batlioni, E., Febles, J., Trejo, J., Dzib, P. y Tuyub, R. (1993). Efecto de las mareas diurnas en las fluctuaciones del nivel del acuífero cárstico costero de El Palmar, Yucatán, México. En *Primera Reunión Nacional Sobre Aguas Subterráneas*. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Canul-Macario, C. (2020). *Dinámica de la Interfase Salina del Acuífero de la Costa Noroeste de Yucatán y Escenarios Frente al Incremento del Nivel Medio del Mar* (Tesis de doctorado no publicada). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guo, W. y Langevin, C. D. (2002). *User's Guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow*. USGS Techniques of Water Resources Investigations. Miami Florida: USGS.
- Herrera-Silveira, J. A.; Comín, F. A. y Capurro, L. (2004). Los Usos y Abusos de la Zona Costera En La Península de Yucatán. En E. Rivera, G. Villalobos, M. Rosado y I. Azuz (Eds.), *El Manejo Costero en México* (pp. 387-396). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS, Universidad de Quintana Roo.
- INEGI (2002). *Estudio Hidrológico del Estado de Yucatán*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- Medina, J. A. (2020). *Caracterización Geohidrológica del Acuífero de la Duna Costera de Sisal, Yucatán* (Tesis de licenciatura no publicada). Universidad Autónoma de Yucatán.
- Perry, E.; Velázquez, G. y Marín, L. (2010). The Hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review*. March 2002. 191-221. 10.2747/0020-6814.44.3.191.
- Perry, E.; Velázquez, G. y Socky, R. (2003). Hydrogeology of the Yucatan Peninsula. In A. Gómez, M. Allen, S. Fedick y J. Jiménez (Eds.), *The Lowland Maya Area: Three Millennia at the Human Wildland Interface* (pp. 115-138). Food Products Press. New York, USA.
- Rodríguez-Huerta, E.; Rosas-Casals, M. y Hernández-Terrones, L. M. (2020). A water balance model to estimate climate change impact on groundwater recharge in Yucatán Peninsula, Mexico. *Hydrological Sciences Journal* 65(3), 470-486.