

DETERMINACIÓN DE LAS APORTACIONES DE AGUA DULCE A LAS LAGUNAS COSTERAS CHACAHUA Y SALINA GRANDE, OAXACA, MÉXICO, POR MEDIO DE ISÓTOPOS AMBIENTALES

• Miguel Ángel Mejía-González • Luis González-Hita •
• Joselina Espinoza-Ayala • José Alfredo González-Verdugo •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Utilizando mediciones de isótopos ambientales (oxígeno 18 y deuterio), así como valores de conductividad eléctrica específica, se determinaron las fuentes de agua dulce y sus aportaciones a las lagunas costeras Chacahua y Salina Grande, Oaxaca. Se consideraron como fuentes posibles de aportación de agua dulce el Río Verde, la precipitación y el acuífero subyacente. La composición isotópica estable de las diferentes familias de agua reveló que cada una de ellas presenta una huella isotópica distintiva, característica que permitió diferenciarlas entre sí y determinar sus proporciones de mezcla en diferentes muestras recolectadas de las lagunas. Los resultados permitieron identificar las fuentes de aportación y sus contribuciones efectivas de agua dulce, las cuales pueden alcanzar hasta el 38% del total de agua que ingresa a las lagunas.

Palabras clave: fuentes de agua dulce, lagunas costeras, isótopos ambientales.

Introducción

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), a través de su Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos (CPH), ha identificado en la cuenca del Río Verde, ubicada en el estado de Oaxaca, México, el proyecto “Aprovechamiento hidráulico Paso de la Reina, Oaxaca”, como una alternativa sustentable para contribuir a satisfacer la demanda de energía eléctrica en la porción central de México (CFE, 1967, 1969, 1986).

Dada la importancia que implica para el país un proyecto de estas características, la CPH, a través del Centro de Anteproyectos del Pacífico Sur, programó el desarrollo de estudios que permitan integrar la Evaluación de Impacto Ambiental, en el marco de los requerimientos de la legislación ambiental vigente. Para ello, la CFE encomendó al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realizar estudios específicos para determinar el impacto del

sistema hidroeléctrico Paso de la Reyna en los recursos de agua subterránea desde la ubicación del sitio del proyecto hasta la desembocadura del Río Verde en el océano Pacífico.

Por sus características, la zona de estudio requiere de un análisis oportuno y detallado del impacto del proyecto hidroeléctrico en los recursos naturales debido a que en ella se ubica el Parque Nacional Lagunas de Chacahua, integrado por una compleja variedad de ecosistemas formados por bosques, estuarios y lagunas, tierras agrícolas de riego y temporal, pastizales, zonas de pesquerías, turismo, etcétera.

Tradicionalmente se ha considerado a las precipitaciones y escurrimientos superficiales como las fuentes principales de agua dulce de los estuarios, mientras que las descargas de agua subterránea se han ignorado, en parte debido a que no son observables en forma directa y a la dificultad de cuantificarlas (Slomp y Van Cappellen, 2004). Estudios globales,

utilizando diferentes métodos, reportan que del total de agua dulce, un porcentaje de 0.1 a 10 corresponde a agua subterránea (Taniguchi *et al.*, 2002). Aunque este porcentaje puede parecer pequeño, no se puede despreciar, porque el agua subterránea generalmente contiene altas concentraciones de nutrientes, entre otros, nitrógeno y fosforo (Li *et al.*, 1999; Price *et al.*, 2006; Kroger *et al.*, 2007).

Estimar las descargas de agua subterránea a las lagunas costeras es difícil. Contrario a las descargas superficiales, las cuales se pueden aforar, los acuíferos descargan en forma difusa sobre extensas áreas o en forma muy puntual a través de fracturas o fallas, o también como una combinación de ambas (Burnett y Dulaiova, 2003).

Una forma de estimar las descargas es utilizando la ley de Darcy. Sin embargo, este método tiene la desventaja de que, por lo general, solamente se tienen unos pocos valores de conductividad hidráulica que se generalizan a todo el acuífero, lo cual puede producir errores significativos en los cálculos. Otro método consiste en las mediciones directas con infiltrómetros. Sin embargo, también este método se complica por la heterogeneidad del subsuelo, haciendo difícil extrapolar datos de un sitio a otro (Shinn *et al.*, 2002). Un método alternativo a los anteriores son los trazadores geoquímicos. Los trazadores geoquímicos que se han utilizado para estimar las descargas incluyen el radón (Burnett y Dulaiova, 2003), isótopos de radio (Moore y Church, 1996), metano (Corbett *et al.*, 1999) y helio (Top *et al.*, 2001).

En este estudio se utilizaron los isótopos estables oxígeno 18 y deuterio, para identificar y cuantificar las aportaciones de agua dulce a las lagunas costeras Chacahua y Salina Grande, Oaxaca, provenientes de tres fuentes posibles: las precipitaciones, el río y el acuífero.

Área de estudio

Las lagunas Chacahua y Salina Grande se localizan en la porción central de la costa sur del estado de Oaxaca, México, en la región

hidrológica RH-21, denominada Costa de Oaxaca, y en colindancia con la región Hidrológica RH-20, denominada Costa Chica-Río Verde, entre las coordenadas UTM 635000 a 645000 en X y 1765000 a 1777000 en Y (Alfaro y Sánchez, 2002).

Las lagunas están comunicadas entre sí y el mar, aspecto que les confiere un carácter salobre. Presentan un eje de orientación paralelo a la costa y una longitud de aproximadamente 10 kilómetros, con forma alargada e irregular, rodeadas por manglares. El área de la laguna Chacahua es de 638 hectáreas y el de Salina Grande es de 305 hectáreas. Son cuerpos de agua someros, de volumen variable, dependiendo de la época de estiaje o lluvias, al igual que su temperatura; fondos fangosos y batimetría irregular, en ocasiones acompañados de amplias llanuras de inundación. En la figura 1 se muestra la localización de las lagunas.

La mayor parte de las corrientes fluviales de la zona son estacionales, únicamente el Río Verde es permanente. Este río es uno de los más grandes de la costa del Pacífico mesoamericano, en términos tanto de cuenca de drenaje como de volumen de escurrimiento (Tamayo, 1964). La cuenca de drenaje alta del Río Verde está compuesta por los valles centrales de Oaxaca, Ejutla y Nochixtlán (figura 2). Estos valles se sitúan en elevaciones que van de los 1 500 a los 2 500 msnm. La cuenca de drenaje baja la componen los valles de la costa. La Sierra Madre del Sur, que alcanza alturas hasta de 3 000 msnm, separa dichas cuencas. El volumen de escurrimiento medio anual de conformidad con la información del periodo 1961-1985 de la estación hidrométrica Paso de la Reyna es de 5 252 millones de m³, con un máximo registrado en 1974 de 8 326 millones de m³ y un mínimo en 1982 de 2 754 millones de m³. Aun cuando las lagunas Chacahua y Salina Grande están fuera de la cuenca del Río Verde, en épocas de crecientes de gran magnitud, el río se desborda y aporta agua a dichas lagunas (Alfaro y Sánchez, 2002).

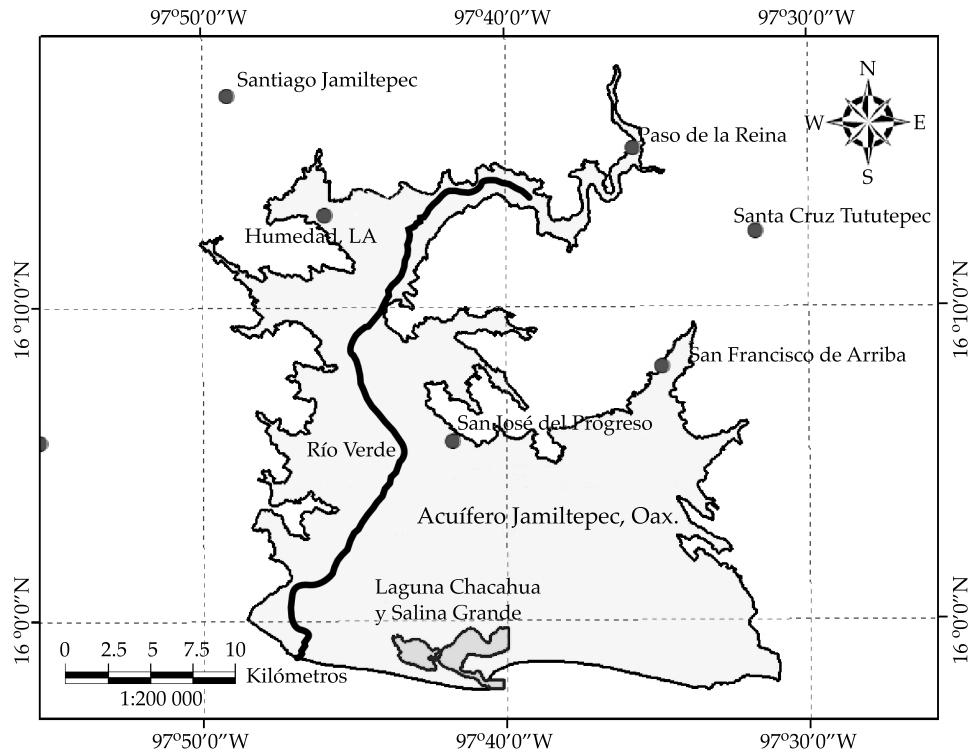


Figura 1. Localización de las lagunas Chacahua y Salina Grande, Río Verde y polígono del acuífero Jamiltepec, Oaxaca.

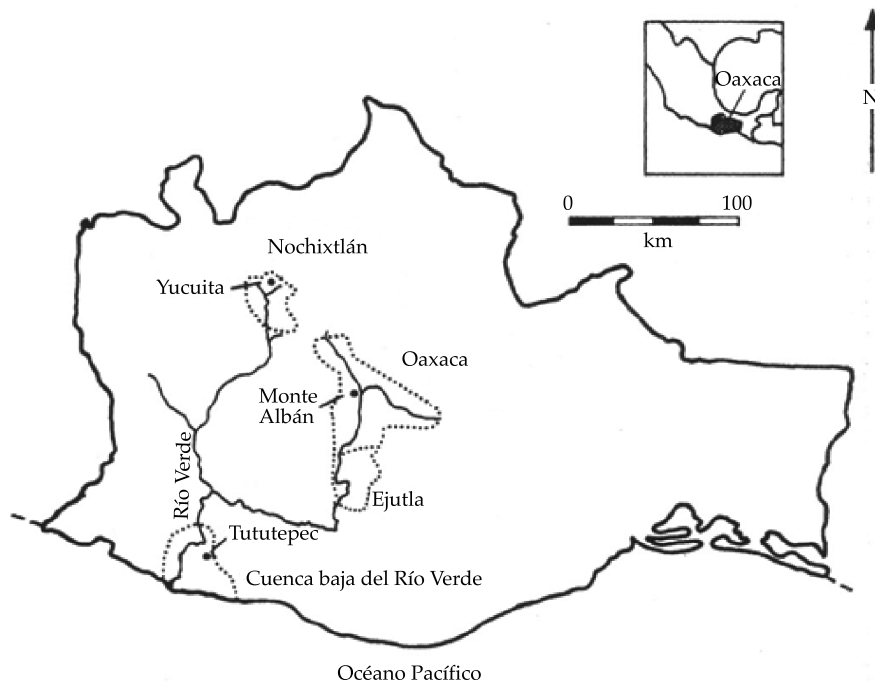


Figura 2. Subcuencas de drenaje del Río Verde, Oaxaca (Joyce y Mueller, 1997).

El área donde se encuentran ubicadas las lagunas Chacahua y Salina Grande forma parte del acuífero denominado "Jamiltepec". Este acuífero abarca un área de 543 km², con un espesor que oscila entre los 40 y 100 m. Dicho acuífero lo constituyen arenas, limos, arcillas y gravas. El acuífero está limitado por rocas ígneas y metamórficas, las cuales funcionan como fronteras. El acuífero es de tipo libre, sin embargo cerca de la línea de la costa existen esteros y lagunas marginales, en cuyos alrededores se han depositado materiales de textura arcillosa, que confinan al acuífero. La profundidad promedio del nivel estático es de un metro en la época de lluvias y de dos metros en la época de estiaje. La temperatura media anual es de 23.2 °C. La temporada de lluvias está comprendida de junio a octubre, y la de estiaje va de noviembre a mayo. La precipitación media anual es de 1 228 mm (Conagua, 1993).

Aguas arriba de las lagunas se localiza el Distrito de Riego 110 Río Verde Progreso, cuyas componentes principales son las siguientes: a) *presa derivadora*, de tipo flotante sobre el cauce del Río Verde, con obras de toma en ambas márgenes, diseñadas para derivar un gasto de 11.56 m³/s hacia la margen izquierda y 4.93 m³/s hacia la margen derecha; b) *red de distribución*, constituida por canales laterales, sublaterales, ramales y subramales, de tipo trapecial, revestidos de concreto limpio, con una longitud total de 222 km; c) *red de drenaje a cielo abierto*, drenes de sección trapecial, con un desarrollo total de 262 km, con 85 uniones de drenes y 176 entradas pluviales; d) *bordos de protección*, que consiste de 21.96 km de bordos de protección contra inundaciones en las zonas de riego en ambas márgenes del Río Verde (Alfaro y Sánchez, 2002).

Metodología

Se tomaron muestras de agua de las lagunas Chacahua y Salina Grande, y del mar; también, debido a que se consideraron tres fuentes

posibles del aporte de agua dulce a las lagunas (del agua del Río Verde, de las precipitaciones y del acuífero), se tomaron muestras de dichas fuentes; así como de diez pozos que se encuentran en la zona de las lagunas. Nueve de los pozos se utilizan para riego agrícola y uno para suministro de agua potable. En promedio, todos tienen una profundidad de 20 m. La colecta de muestras para análisis de laboratorio se realizó de acuerdo con los procedimientos señalados en la literatura especializada (Claassen, 1982).

Se recolectaron muestras de agua de lluvia en cuatro sitios: distrito de riego que se encuentra a una altitud de 16 msnm, San José de las Flores, a una altitud de 600 msnm; Peñas Negras, a una altitud de 900 msnm; y las Limas, a una altitud de 1 600 m. Se tomaron muestras a diferentes altitudes para determinar la variación en la composición isotópica de la lluvia debido al efecto de altitud. La recolección cubrió toda la temporada de lluvias, por lo cual los resultados isotópicos corresponden a un promedio ponderado de toda la temporada. El sistema que se utilizó se diseñó para medir la precipitación y recolectar el agua de lluvia en forma inalterada, sin evaporación. Wassenaar *et al.* (2009) reportan valores isotópicos de la precipitación en la cuenca alta.

Las muestras del Río Verde se tomaron en la estación de aforo que se encuentra ubicada en un puente de la carretera federal Pinotepa Nacional-Puerto Escondido, a la altura del poblado San Antonio Río Verde.

En la laguna de Chacahua se tomaron 18 muestras; en la laguna Salina Grande, cuatro y en el mar, dos. En la figura 3 se muestra la localización de los sitios muestreados. El muestreo se realizó en el mes de octubre, es decir, al terminar la temporada de lluvias.

A todas las muestras se les determinó su contenido de oxígeno 18 (¹⁸O), deuterio (²H), conductividad eléctrica y temperatura.

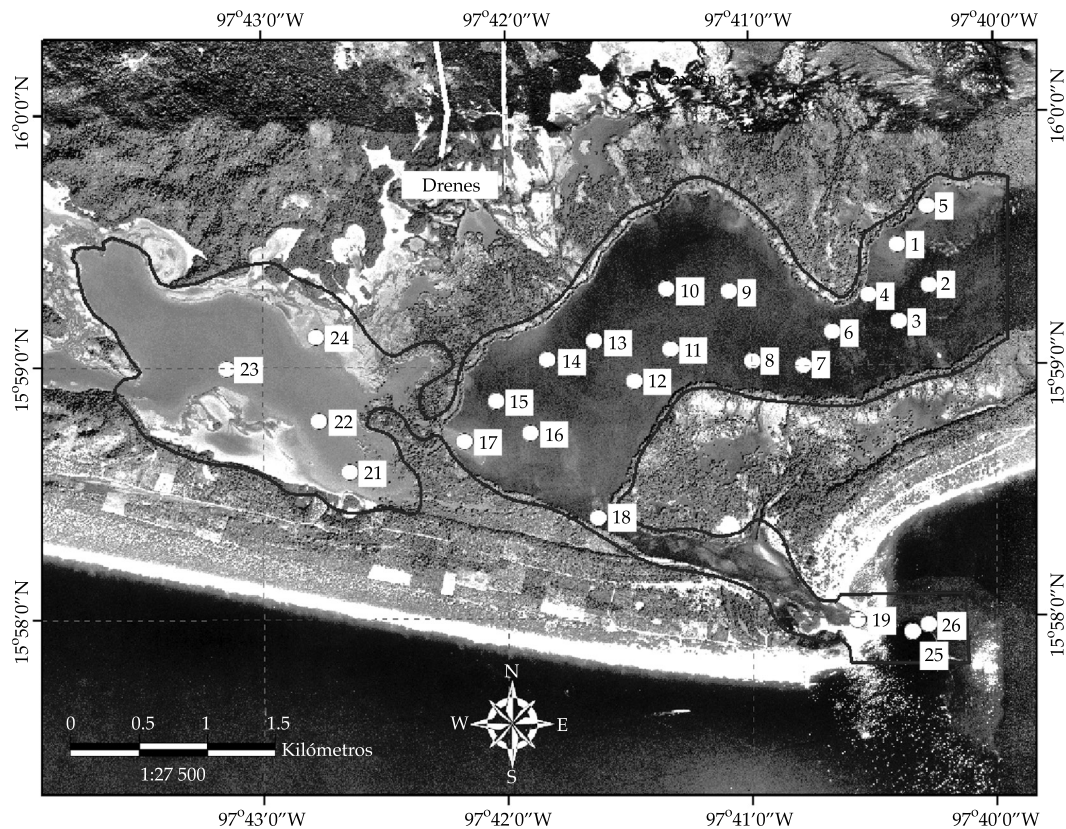


Figura 3. Localización de los sitios de muestreo de las lagunas y el mar.

Resultados

En la figura 4 se muestran los valores de conductividad eléctrica específica de las lagunas. Como se puede apreciar, los valores de la laguna Chacahua son parecidos a los valores del agua del mar (51 mS/cm), excepto en dos zonas donde se presentan valores más bajos: 34 y 32 mS/cm. También se puede apreciar que todos los valores de la laguna Salina Grande tienen conductividades menores que la del mar (36 mS/cm).

En el diagrama binario $\delta^{18}\text{O}$ (‰) vs. $\delta^2\text{H}$ de la figura 5, se representa la composición isotópica de las fuentes de agua dulce existentes en la zona. Como se puede ver, cada tipo de agua tiene una huella isotópica distintiva, por lo cual es posible diferenciarlas y determinar

sus orígenes, y porcentajes correspondientes de mezcla.

Método de isótopos de regresión lineal

Para determinar las fuentes de agua dulce, se utilizó un modelo de mezcla geoquímico (Stalker *et al.*, 2009). En este modelo se grafican los valores de deuterio contra la conductividad eléctrica y se les ajusta una recta. La intersección de la recta extrapolada con los valores de conductividad cero representa la composición isotópica del agua dulce que produce la mezcla "diluida".

Esto se debe a que en una mezcla de agua dulce y agua de mar, los parámetros de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ se comportan de forma conservativa, esto es, sólo dependen de la proporción de



Figura 4. Valores de conductividad (mS/cm) de las lagunas y el mar.

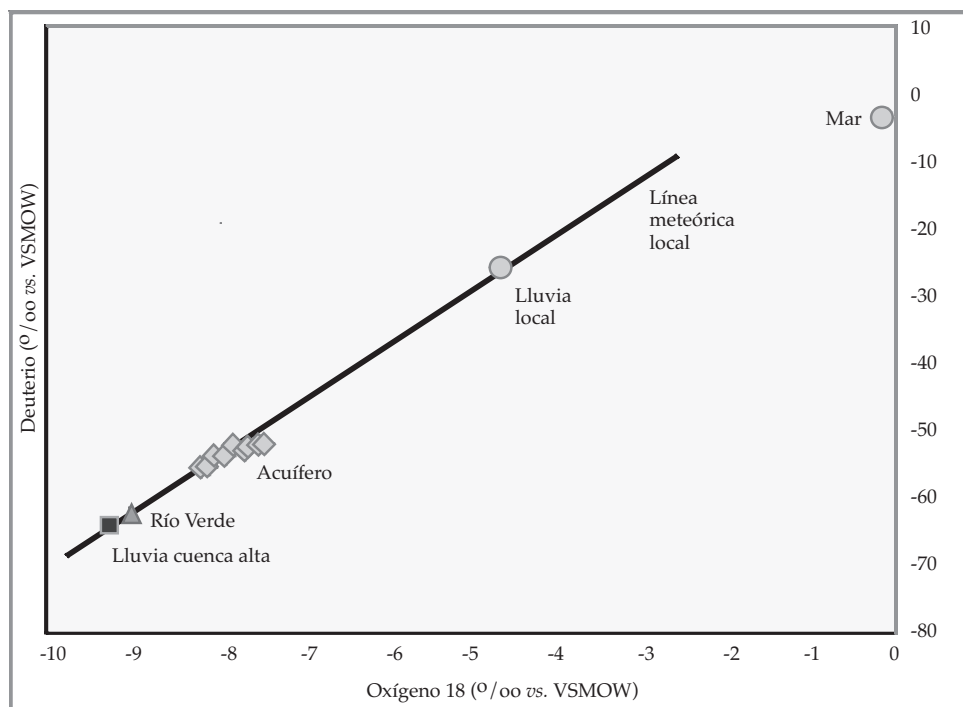


Figura 5. Composición isotópica de las posibles fuentes de agua de las lagunas.

mezcla de ambos componentes, así como de la salinidad. Esto permite obtener una relación lineal entre el $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$) y la salinidad.

En la figura 6 se muestran los valores de deuterio contra conductividad eléctrica de las muestras de agua que se recolectaron en las lagunas. A estos valores se les ajustó una recta, la cual, como se puede apreciar, tiene en un extremo la componente de mar y, en el otro extremo, la componente de aguas de lluvia. Dado que la intersección de la recta con los valores de conductividad cero representa la composición isotópica del agua dulce presente en las lagunas, entonces la gráfica indica que la fuente de agua dulce proviene de las precipitaciones. Es posible que esta agua sea recolectada en el distrito de riego por los diferentes drenes que lo cruzan, y posteriormente la descarguen en la lagunas, ya que ahí terminan dichos drenes. En la figura 7 se muestra uno de los drenes que descarga en las lagunas Chacahua y Salina Grande.

En el cuadro 1 se muestran los porcentajes de agua dulce y marina de cada muestra de agua que se tomó en las lagunas. En la figura 8 se muestran dichos porcentajes con curvas de nivel.

Los porcentajes se calcularon utilizando un modelo de mezcla lineal de dos componentes (Eby, 2004):

$$\delta^2 H_{\text{muestra}} = \sigma \delta^2 H_{\text{mar}} + (1 - \sigma) \delta^2 H_{\text{agua dulce}}$$

donde σ es el porcentaje de agua de mar y $(1 - \sigma)$ es el porcentaje de agua dulce.

En la figura 9 se muestra un perfil electroestratigráfico del acuífero. En este perfil se pueden apreciar tres unidades: la unidad U2B, que está asociada con material granular arcilloso; la unidad U2C, asociada con material arenoso grueso saturado, y la unidad U3, asociada con material rocoso poco permeable o impermeable. En el lado derecho de la figura, que corresponde al distrito de riego, se puede

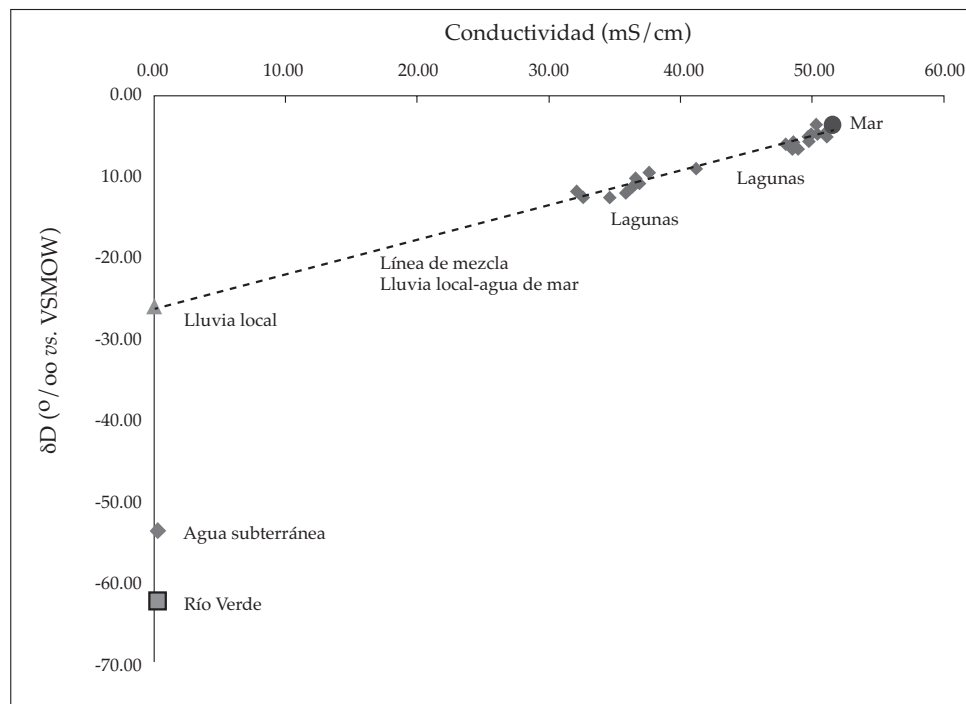


Figura 6. Deuterio contra conductividad de las posibles fuentes de agua de las lagunas Chacahua y Salina Grande.



Figura 7. Dren del distrito de riego que descarga en las lagunas.

Cuadro 1. Composición de las muestras de agua de las lagunas.

Muestra	Agua de mar (%)	Agua dulce (%)
1	62.2	37.8
5	62.2	37.8
15	64.86	35.14
22	67.56	32.44
21	67.56	32.44
17	70.27	29.73
24	70.27	29.73
23	71.89	28.11
14	78.37	21.63
3	91.89	8.11
4	91.89	8.11
2	91.89	8.11
18	91.89	8.11
7	95.67	4.33
13	95.67	4.33
6	95.67	4.33
10	95.67	4.33
9	95.67	4.33
16	95.67	4.33
8	95.67	4.33
12	98.37	1.63
11	98.37	1.63
25	100.00	0.00
26	100.00	0.00

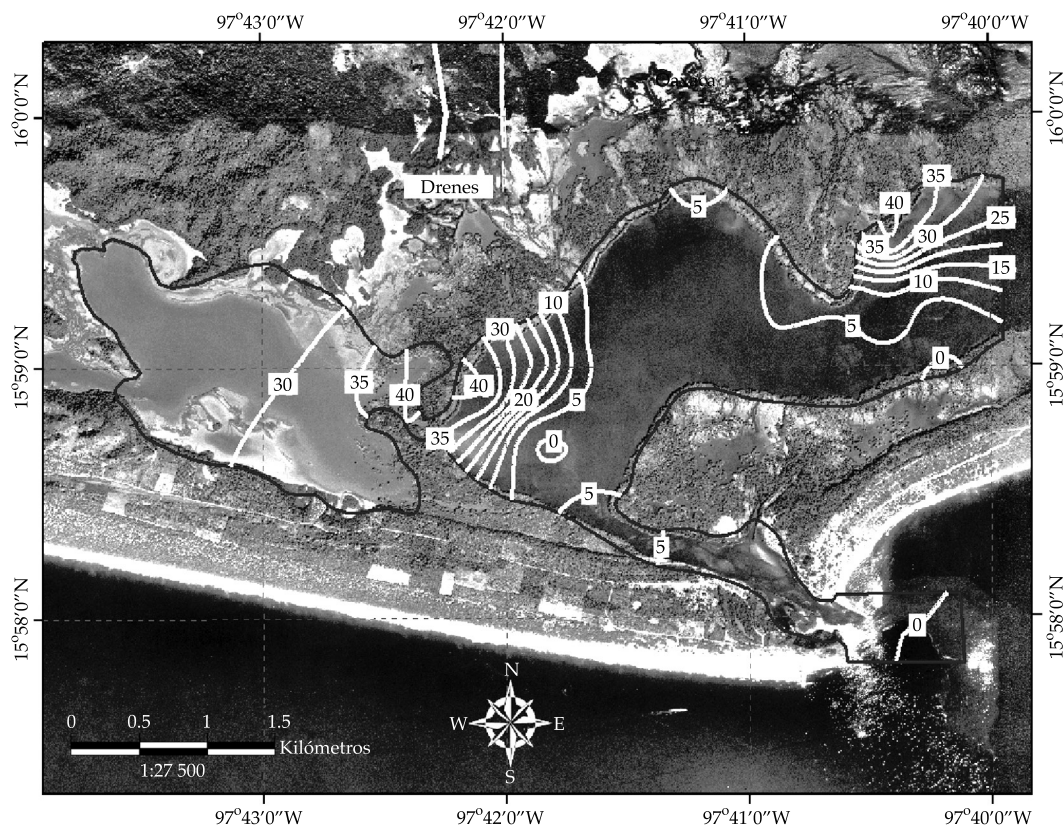


Figura 8. Porcentajes de agua dulce en las lagunas Chacahua y Salina Grande.

apreciar que el acuífero es libre. En el lado izquierdo, que corresponde a la zona de las lagunas, se puede apreciar que una capa de arcilla (unidad U2C) confina al acuífero. De hecho, los pozos de la zona de las lagunas son de tipo brotante. Se considera que tal vez esta capa impide que el agua subterránea descargue en las lagunas, razón por la cual no se detectó en las muestras de agua que se tomaron de las lagunas.

Discusión

Los datos isotópicos indican que: 1) las zonas altas de la cuenca son las principales aportadoras de agua del Río Verde; 2) las precipitaciones de las zonas bajas son las principales aportadoras de agua dulce a las

lagunas Chacahua y Salina Grande, y 3) la descarga del Río Verde a dichas lagunas es mínima.

Por lo tanto, un cambio en el régimen hidrológico del Río Verde debido al aprovechamiento hidráulico "Paso de la Reina", no afectaría de manera significativa la recarga de agua dulce a las lagunas Chacahua y Salina Grande.

Conclusiones

Primera

Utilizando trazadores ambientales naturales (deuterio y oxígeno 18) y mediciones de campo de la conductividad eléctrica, se determinaron

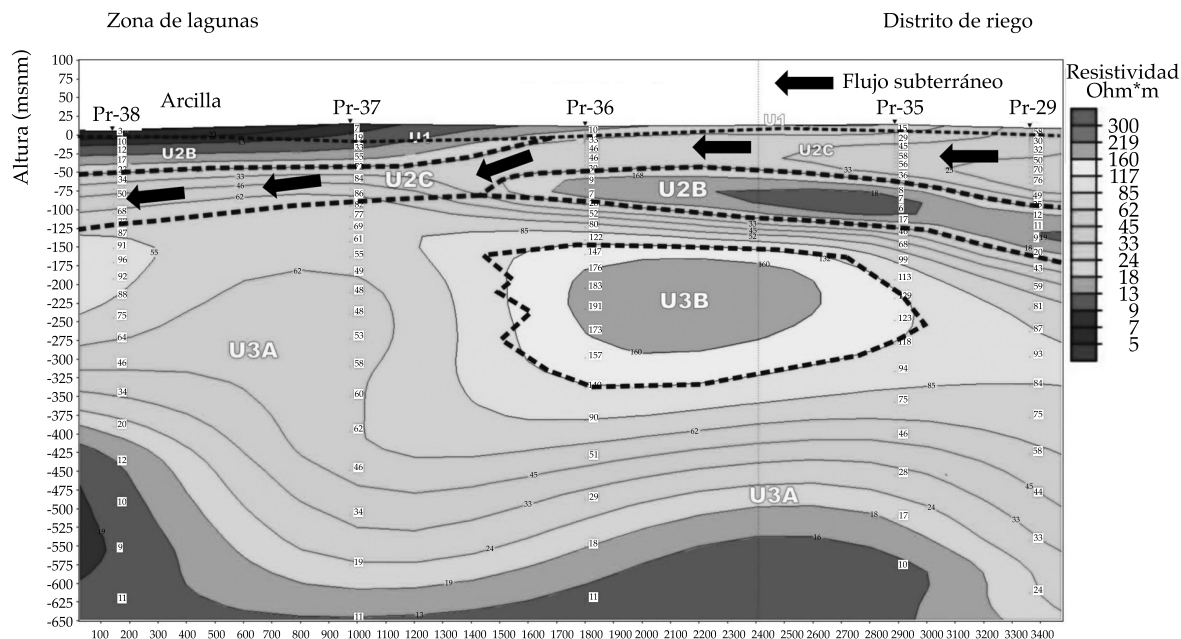


Figura 9. Modelo conceptual del flujo en el acuífero.

los aportes de agua dulce a las lagunas Chacahua y Salina Grande en la temporada de lluvias. Se consideraron tres fuentes posibles del aporte: agua del Río Verde, agua de la lluvia y agua del acuífero.

El modelo de mezcla que se utilizó reveló que la principal fuente de agua dulce a las lagunas son las precipitaciones locales. Es posible que esta agua sea descargada en las lagunas por los drenes que vienen del distrito de riego, ya que en las zonas donde se encontró mayor porcentaje de agua dulce es donde descargan los drenes.

Derivado de lo anterior, se concluye que el aporte de agua subterránea a las lagunas, en la temporada de lluvias, es pequeño.

Se recomienda realizar un análisis semejante en la temporada de estiaje.

Segunda

El método isotópico que se presentó en este trabajo se puede aplicar a sistemas lagunares

costeros con condiciones similares y provee otra metodología para cuantificar las descargas de los acuíferos costeros. Logísticamente, la recolección de las muestras es relativamente simple, comparado con otros métodos, y el análisis isotópico de las muestras es una metodología ya bien establecida.

Recibido: 21/07/10

Aceptado: 10/02/12

Referencias

- ALFARO, M. y SÁNCHEZ, G. *Chacahua: Reflejos de un Parque*. México, D.F.: Plaza y Valdés Editores, 2002.
- BURNETT, W.C. and DULAIIOVA, H. Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 69, No. 1-2, 2003, pp. 21-35.
- CFE. *Potencialidad hidroeléctrica del estado de Oaxaca, México*. México, D.F.: Comisión Federal de Electricidad, 1967.
- CFE. *Estudio integral preliminar de los aprovechamientos hidroeléctricos en la cuenca del Río Verde, Oaxaca, México*. México, D.F.: Comisión Federal de Electricidad, 1969.

- CFE. *Avance en los estudios de evaluación del sistema hidrológico costa de Oaxaca, México*. México, D.F.: Comisión Federal de Electricidad, 1986.
- CLAASSEN, H.C. *Guidelines and techniques for obtaining water samples that accurately represent the water chemistry of an aquifer*. U.S. Geol. Surv. Open File Report. No. 82-1024, 1982, 49 pp.
- CONAGUA. *Estudio hidrobiológico de las lagunas Chacahua-Pastoria, Oaxaca, México*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 1993.
- CORBETT, R.D., CHANTON, J., BURNETT, W., DILLON, K., and RUTKOWSKI, C. Patterns of groundwater discharge into Florida Bay. *Limnology and Oceanography*. Vol. 44, 1999, pp. 1045-1055.
- EBY, G.N. *Principles of environmental geochemistry*. Florence, USA: Brooks/Cole, 2004.
- JOYCE, A. and MUELLER, R. Prehispanic human ecology of the Río Verde drainage basin, México. *Riverine Archaeology*. Vol. 29, No. 1, 1997, pp. 75-94.
- KROGER, K.D., SWARZENSKI, P.W., REICH, C., and GREENWOOD, W.J. Submarine groundwater discharge to Tampa Bay, nutrient fluxes and biogeochemistry of the coastal aquifer. *Marine Chemistry*. Vol. 104, 2007, pp. 85-97, doi: 10.1016/j.marchem.2006.10.012.
- LI, L., BARRY, D.A., STAGNITT, F., and PARLANGE, J.-Y. Submarine groundwater discharge and associated chemical inputs to a coastal sea. *Water Resource Research*. Vol. 35, No. 11, 1999, pp. 3253-3260, doi: 10.1029/1999WR900189.
- MOORE, W.S. and CHURCH, T.M. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by Radon enrichments. *Nature*. Vol. 380, 1996, pp. 612-614.
- PRICE, R.M., SWART, P.K., and FOURQUREAN, J.W. Coastal groundwater discharge – an additional source of phosphorous for the oligotrophic wetlands of the Everglades. *Hydrobiologia*. Vol. 569, 2006, pp. 23-36, doi: 10.1007/s10750-006-0120-5.
- SHINN, E.A., REICH, C.D., and HICKEY, T.D. Seepage meters and Bernoulli's revenge. *Estuaries*. Vol. 25, 2002, pp. 126-132, doi: 10.1007/BF02696056.
- SLOMP, C. and VAN CAPPELLEN, P. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: controls and potential impacts. *Journal of Hydrology*. Vol. 295, No. 1-4, 2004, pp. 64-86.
- STALKER, J., PRICE, R., and SWART, P. Determining spatial and temporal inputs of freshwater, including submarine groundwater discharge, to a subtropical estuary using geochemical tracers, Biscayne Bay, South Florida. *Estuaries and Coasts*. Vol. 32, 2009, pp. 694-708.
- TANIGUCHI, M., BURNETT, W.C., CABLE, J.E., and TURNER, J.V. Investigation of Groundwater Discharge. *Hydrologic Processes*. Vol. 16, No. 11, 2002, pp. 2115-2129, doi: 10.1002/hyp.1145.
- TOP, Z., BRAND, L.E., CORBETT, R.D., BURNETT, W., and CHANTON, J.P. Helium and radon as tracers of groundwater input into Florida Bay. *Journal of Coastal Research*. Vol. 17, 2001, pp. 859-868.
- WASSENAAR, L.I., VAN WILGENBURG, S.L., LARSON, K., and HOBSON, K.A. A Groundwater Isoscape for Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*. 2009, Vol. 102, pp. 123-136.

Abstract

MEJÍA-GONZÁLEZ, M.A., GONZÁLEZ-HITA, L., ESPINOZA-AYALA, J. & GONZÁLEZ-VERDUGO, J.A. Use of environmental isotopes to determine the contribution of fresh water to Chacahua and Salina Grande coastal lagoons, Oaxaca Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 3, July-September, 2012, pp. 53-64.

Using measurements of stable isotopes (oxygen 18 and deuterium) as well as values for specific electrical conductivity, the sources of fresh water were determined as well as their contributions to the coastal lagoons of Chacahua and Salina Grande. Three possible sources were considered: the Verde River, rain and the underlying aquifer. The stable isotopic composition of the different families of water revealed that each one has a distinctive footprint, which enabled distinguishing one from the other and determining their mixing ratios based on different water collected taken from the lagoons. Results enabled the identification of sources of fresh water sources and their effective contributions, which can account for as much as 38% of the total water entering the lagoons.

Keywords: fresh water sources, coastal lagoons, environmental isotopes.

Dirección institucional de los autores

Dr. Miguel Ángel Mejía González
Fís. Luis González Hita
Dra. María Joselina Clemencia Espinoza Ayala
M.I. José Alfredo González Verdugo

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: + 52 (777) 3293600
mamejia@tlaloc.imta.mx
lghita@tlaloc.imta.mx
jespinoz@tlaloc.imta.mx
gonzal@tlaloc.imta.mx