

Caracterización fisicoquímica e isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de la región norte del acuífero Tempisque, Costa Rica

Ariana Ordoñez-Olivares¹  & Wilson Beita-Sandí¹ 

1. Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA), Laboratorio de Calidad de Aguas, 2060 San Pedro, San José, Costa Rica; arianaord@gmail.com; wilson.beita@ucr.ac.cr

Recibido 09-VIII-2019 • Corregido 20-I-2020 • Aceptado 06-II-2020

DOI: <https://doi.org/10.22458/urj.v12i1.2588>

ABSTRACT. “Physicochemical and isotopic ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) characterization of the northern region of Tempisque aquifer, Costa Rica”. **Introduction:** Groundwater resources supply 70% of drinking water in Costa Rica. Groundwater is in risk of pollution and overexploitation due to the lack of good management practices. There has been an increase in the number of wells registered in the Guanacaste area, particularly in the Tempisque aquifer. **Objective:** To investigate and generate new physicochemical and isotopic information ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) to characterize the water resource of the northern region of the Tempisque aquifer. **Methodology:** We conducted four groundwater samplings in 12 groundwater wells between May 11 and November 12, 2010. We analyzed water samples to determine stable isotopes using off-axis integrated cavity output spectroscopy and also for physicochemical characterization. **Results:** We classified groundwater as hard and very hard water. The range of measured pH values was 6.57–7.91. The average conductivity in the study area was $437\mu\text{S}/\text{cm}$. The range of bicarbonate concentrations was $129\text{--}342\text{mg}/\text{L HCO}_3^-$. The groundwater in the northern region of the Tempisque aquifer is calcium bicarbonate and is characterized by an average temperature of 28.0°C . **Conclusions:** A decade ago, we found no groundwater contamination by metals neither evidence of saline intrusion. The aquifer recharge areas are at the same heights and some wells are characterized by meteorological recharges.

Keywords: Ground water, pollution, stable isotopes, Tempisque, Guanacaste.

RESUMEN. Introducción: El 70% del agua potable en Costa Rica se obtiene de fuentes subterráneas, que están en peligro de contaminación y de sobreexplotación debido a la falta de una adecuada gestión. Se ha dado un aumento en la cantidad de pozos registrados en la zona de Guanacaste, particularmente en el acuífero Tempisque. **Objetivo:** Investigar y generar nueva información fisicoquímica e isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) para caracterizar el recurso hídrico de la región norte del acuífero Tempisque que se espera sirva como base para determinar el origen de la recarga del acuífero Tempisque. **Metodología:** Realizamos cuatro muestreos de agua subterránea, en 12 estaciones entre el 11 de mayo y el 12 de noviembre del 2010. Las muestras de agua se analizaron para determinar el contenido de isótopos estables mediante espectroscopia de cámara integrada con salida fuera de eje y además para caracterizarlas fisicoquímicamente. **Resultados:** Clasificamos las aguas subterráneas como aguas duras y muy duras. El ámbito de valores de pH medidos fue 6.57–7.91. La conductividad promedio en la zona de estudio fue $437\mu\text{S}/\text{cm}$. El ámbito de concentraciones de bicarbonato fue de $129\text{--}342\text{mg}/\text{L HCO}_3^-$. Las aguas subterráneas de la región norte del acuífero Tempisque son del tipo bicarbonatadas cálcicas caracterizadas por una temperatura promedio de 28.0°C . **Conclusiones:** Hace una década no determinamos contaminación en el agua subterránea por metales y además no encontramos evidencia de instrusión salina. Las zonas de recarga del acuífero están a las mismas alturas y algunos pozos se caracterizan por recargas meteóricas

Palabras clave: Aguas subterráneas, contaminación, isótopos estables, Tempisque, Guanacaste.

Sólo el 2,5% del agua en el planeta Tierra es agua dulce y el 97,5% restante es agua salada. Del agua dulce sólo el 1% está disponible para actividades humanas (IAEA, 2019). En Costa Rica, el 70% del agua potable se obtiene de fuentes subterráneas, que están en peligro de contaminación y de sobreexplotación debido a la falta de una adecuada gestión (Jiménez & González, 2001). Según el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), para el año 2005 existían en la provincia de Guanacaste 4 000 pozos registrados (Arias Salguero, Losilla Penón, & Arredondo Li, 2006; Valverde, 2013). Para el 2010, la cantidad de pozos aumentó en un 14% (SENARA, 2010). Este aumento en la cantidad de pozos ha sido mayor en el acuífero Tempisque, ya que es uno de los más importantes de la zona de Guanacaste (Kuzdas, 2012).

La interacción entre el agua subterránea y los materiales geológicos de suelos y rocas, provee la gran variedad de constituyentes orgánicos e inorgánicos disueltos en el agua; sin embargo, las precipitaciones y deposiciones atmosféricas sobre las áreas de recarga del agua subterránea pueden variar la composición química del agua (Townley & Trefry, 2000). Otras modificaciones pueden ocurrir también por fenómenos como la evapotranspiración, procesos biológicos en el suelo y mezclas con agua de mar (Saunders et al., 2006; Scherer, Richter, Valentine, & Alvarez, 2000; Townley & Trefry, 2000).

Los principales problemas de gestión de las aguas subterráneas surgen debido al uso del suelo (e.g., la agricultura intensiva) (Swartjes et al., 2012; Wang, He, & Chen, 2012; Cuadrado Quesada, 2017). Por ejemplo, las plantaciones de melón y de caña de azúcar utilizan grandes cantidades de plaguicidas e insecticidas (Velasco, Rodríguez, Castillo, & Ortíz, 2012; Kasambala Donga & Eklo, 2018). Por otro lado, la ganadería también contribuye a la contaminación (e.g., nitratos, hormonas y antibióticos) de los recursos acuáticos (Reynolds-Vargas, Fraile-Merino, & Hirata, 2006; Kemper, 2008). La descomposición de las heces pueden introducir elevadas cantidades de nitratos en los acuíferos (He, Lu, & Shi, 2007; Fathmawati, Fachiroh, Sutomo, & Putra, 2018). Las hormonas y antibióticos administrados a los animales pueden encontrarse disueltos en el agua subterránea y superficial (Kemper, 2008). El fuerte aumento de la demanda de agua por parte de la industria turística ha contribuido también al estrés hídrico en la región de Guanacaste (Mende, Astorga, & Neumann, 2007).

Estudios con isótopos estables (e.g., ^{18}O y ^2H) permitieron determinar que existe un elevado grado de interacción entre las aguas subterráneas y superficiales en el sector central y sur del valle del río Tempisque. En esta área existe una alta tasa de infiltración de las aguas superficiales en el acuífero (Gómez Cruz & Arredondo, 1994). Estos últimos autores propusieron una línea meteórica local para Costa Rica ($\delta^2\text{H} = 7,99\delta^{18}\text{O} + 10,5$). Sin embargo, dada la complejidad del régimen de precipitaciones de Costa Rica los autores no pudieron distinguir un único proceso responsable del fraccionamiento isotópico en la precipitación media mensual. Lachniet y Patterson (2002) realizaron una caracterización isotópica de aguas superficiales de ríos y lagos de Costa Rica e indicaron la ecuación de la línea meteórica local para Costa Rica $\delta^2\text{H} = 7,8\delta^{18}\text{O} + 7,9$ (IAEA, 2019). Aunque los estudios previos (Gómez Cruz & Arredondo, 1994; Lachniet & Patterson, 2002) sirven como una base para proponer una caracterización isotópica de algunas zonas del acuífero Tempisque; ninguno de ellos mostró en conjunto una caracterización fisicoquímica e isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de la región norte de este acuífero.

En Costa Rica no existe a nivel gubernamental, una planificación a largo plazo para la explotación del agua subterránea. El objetivo de este proyecto fue investigar y generar nueva información fisicoquímica e isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) para caracterizar el recurso hídrico de la región norte del acuífero Tempisque y se espera sirva como base para determinar el origen de la recarga del acuífero Tempisque.



MATERIALES AND MÉTODOS

Área de estudio: El acuífero Tempisque se ubica en la provincia de Guanacaste, en la región Pacífico Norte y pertenece a la cuenca del río Tempisque, la cual posee un área de 5 405km² siendo la más grande de Costa Rica (Jiménez & González, 2001). El acuífero Tempisque, con un área de 926km², está formado por un acuífero confinado y uno freático y está compuesto por intercalaciones de lentes de grava, arenas y arcillas, con espesores que varían entre 10m y 80m (Gómez Cruz & Arredondo, 1994). Para este proyecto se estudió el área del acuífero Tempisque localizada en la región norte entre las coordenadas Lambert 344 000 – 367 000 E y 265 000 – 284 000 NE, abarcando un área de 154km² e incluyó a las comunidades de Guardia, Sardinal y Filadelfia. El uso de la tierra en esta región está dominado por la producción agrícola y una elevada actividad ganadera. En la planicie aluvial del valle de Tempisque predomina el cultivo de arroz, caña de azúcar y melón. En la región del Pacífico Norte predominan dos períodos bien definidos, uno seco (diciembre–abril) y otro lluvioso (mayo–noviembre) (Calvo, 1990; Solano-Quintero & Villalobos-Flores, 2001). La precipitación anual es de 1800mm y la temperatura media mensual es de 28°C.

Muestreo: Se realizaron cuatro muestreos de agua subterránea, en 12 estaciones entre el 11 de mayo y el 12 de noviembre del 2010 (Fig. 1 y Cuadro S1 del Apéndice Digital). Los pozos utilizados en este estudio fueron purgados antes de tomar las muestras. Para el análisis isotópico, las muestras se recolectaron en botellas de vidrio de 100mL color ámbar, y en botellas de plástico oscuras de 100mL, previamente enjuagadas con 1% HNO₃ para análisis de metales pesados. Las muestras se conservaron en hielo durante la gira de recolección y el transporte al laboratorio donde fueron almacenadas en un cuarto frío a 4°C.

Análisis: Las muestras para análisis de isótopos estables fueron filtradas con un filtro de membrana de vidrio de 0,45µm, antes de ser inyectadas en el analizador Los Gatos Research (DLT-100). Este analizador utiliza espectroscopía de cámara integrada con salida fuera de eje (OA-ICOS) y la fracción molar de ¹⁸O/¹⁶O y ²H/¹H en el agua se determina simultáneamente por la absorción medida usando la ley de Beer (Socki, 1999). Los análisis fisicoquímicos se realizaron siguiendo métodos estándares (SM) (APHA, AWWA, & WEF, 2005). Aluminio, arsénico, cadmio, cromo, estaño, níquel, plomo analizados según SM 3113–B. Cobre, hierro y zinc por SM 3111–B. Conductividad SM 2510–B. Dureza total SM 2340–C. Bromuro, cloruro, nitrato y sulfato por SM 4110 C. Calcio 3500–Ca. Magnesio SM 3500–Mg. Potasio SM 3500–A. Sodio SM 3500–B. pH SM 4500–H. SiO₂ 4500 Si–D. Sólidos disueltos totales (SDT) SM 2150–B. La alcalinidad (SM 2320–B) y temperatura (SM–2550) se midieron en el campo.

Ética, conflicto de intereses y declaración de financiamiento: La autora y el autor declaran haber cumplido con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en el manuscrito; que no hay conflictos de interés de ningún tipo, y que todas las fuentes financieras se detallan plena y claramente en la sección de agradecimientos. Asimismo, están de acuerdo con la versión editada final del documento. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.



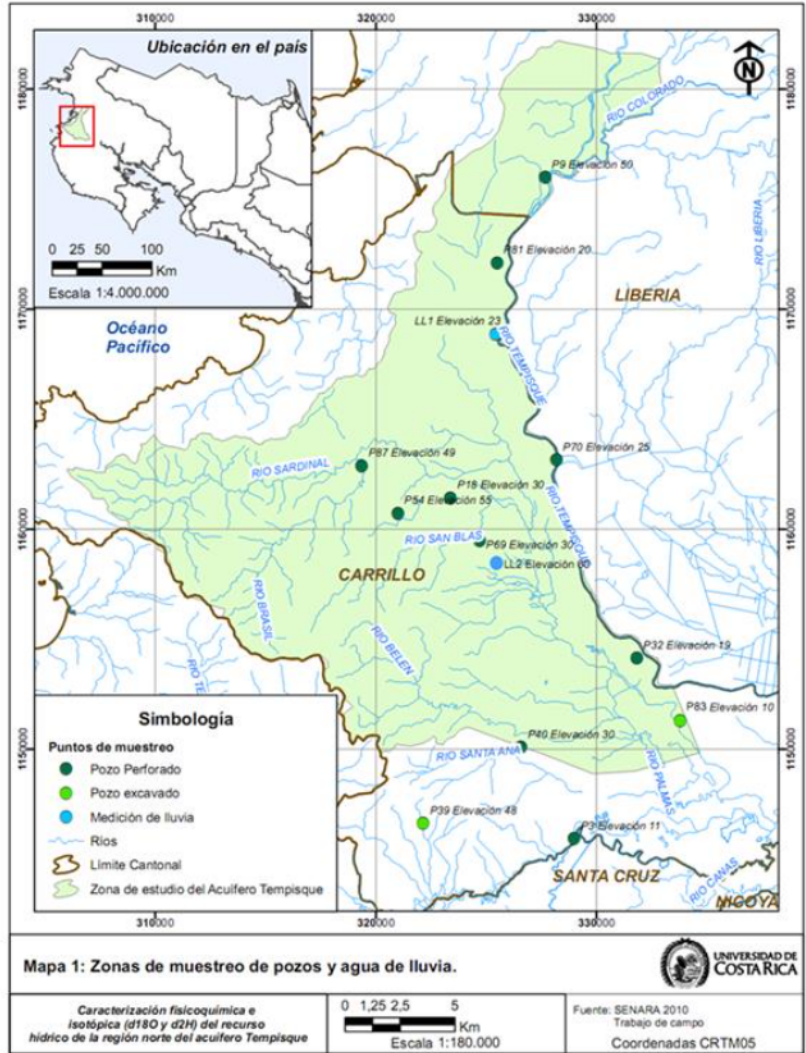


Fig. 1. Ubicación de las estaciones de muestreo de agua subterránea, región norte del acuífero Tempisque. Elaborado por Orozco (2010).

RESULTADOS

Resultados fisicoquímicos: Los resultados de los análisis fisicoquímicos de la estación P83 se muestran en el Cuadro 1. Se realizó una prueba de chi-cuadrado (χ^2) y se determinó que la mayoría de los datos presentan una distribución no normal. Los resultados de los análisis fisicoquímicos permitieron encontrar características particulares de cada uno de los pozos de agua subterránea estudiados. Las concentraciones de bicarbonato se encontraron en el ámbito 128,5–342,4mg/L HCO_3^- . El pozo P54 presentó la mayor concentración promedio 340mg/L HCO_3^- ; y P9 la menor concentración promedio 134mg/L HCO_3^- .

El calcio varió en el ámbito de 20,6–63,4mg/L Ca^{2+} . Al igual que bicarbonato, la menor concentración de calcio se presentó en el pozo P9, que mostró una concentración promedio de 22,7mg/L Ca^{2+} ; la estación P54 presentó la mayor concentración promedio 62,2mg/L Ca^{2+} . P9 y P81 se encuentran cercanos, además sus bajas concentraciones pueden ser atribuibles a la influencia

del río Tempisque ya que ambos se encuentran a poca distancia del río. El cloruro se midió en un ámbito de concentraciones de 1,4–15,5mg/L Cl^- . En este caso la menor concentración promedio de cloruros se presentó en el pozo P39, el cual mostró una concentración promedio de 1,6mg/L Cl^- ; el pozo P70 presentó la mayor concentración promedio de 13,6mg/L Cl^- .

La conductividad varió entre 281,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 553,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La menor conductividad promedio se midió en el pozo P9, con un valor de 300,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el pozo P54 presentó la mayor conductividad promedio de 522,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La dureza total varió en el ámbito de 88,0–253,4mg/L CaCO_3 . El pozo P9, con un valor promedio de 97,2mg/L CaCO_3 , presentó la dureza total más baja; mientras que el pozo P54 mostró la dureza total promedio más alta de 251,1mg/L CaCO_3 . La concentración de magnesio se mantuvo entre 8,9 y 25,7mg/L Mg^{2+} . Una vez más la estación P9 con un valor promedio de 9,8mg/L Mg^{2+} , presentó la concentración de magnesio más baja, ya que este parámetro está directamente relacionado con las variables de bicarbonato, calcio, conductividad y dureza total, como se demostró en el análisis de componentes principales. La estación P40 mostró la concentración promedio de magnesio más alta de 24,1mg/L Mg^{2+} . La variación en la concentración de nitratos se mantuvo en un ámbito de 1,6mg/L NO_3^- y 53,1mg/L NO_3^- . La menor concentración promedio de nitratos se encontró en la estación P54 con 1,7mg/L NO_3^- y la mayor concentración promedio de nitratos fue de 43,7mg/L NO_3^- , para la estación P32. Las estaciones P70 y P81 muestran valores alrededor de 25 y 11mg/L NO_3^- , respectivamente. El pH se mantuvo constante, los valores se mantuvieron entre 6,6 y 7,9. La estación P9 presentó el menor valor promedio de 6,8 y la estación P3 con un valor promedio de 7,8 fue la que tuvo el pH más alto a lo largo de todos los muestreos. La concentración de potasio varió entre 0,30mg/L y 6,2mg/L K^+ . Las estaciones P3 y P87 indican el menor valor promedio en la concentración de potasio 0,30mg/L K^+ . La estación P81 mostró la mayor concentración promedio de potasio con un valor de 5,8mg/L K^+ . La concentración de sodio se mantuvo entre 9,1mg/L y 23,2mg/L Na^+ . El pozo P9 presentó la mayor concentración promedio de sodio con un valor de 17,9mg/L Na^+ , y P87 mostró la menor concentración promedio de sodio de 9,8mg/L Na^+ . El ámbito de concentración de silicio estuvo entre 152,8mg/L y 324mg/L Si. El pozo P9 presentó la mayor concentración promedio de 310,5mg/L Si, y P3 mostró la menor concentración promedio de silicio; 156,4mg/L Si. El ámbito de concentración para los sólidos disueltos totales fue de 156,4–382,4mg/L. El pozo P54 mostró la mayor concentración promedio en sólidos disueltos totales, con un valor de 356,8 mg/L; mientras que P87 con un valor promedio de 244,2mg/L fue el más bajo. La concentración de sulfatos se mantuvo entre 2,1mg/L SO_4^{2-} y 19,3mg/L SO_4^{2-} . En el pozo P39 se midió la menor concentración promedio de sulfato de 2,6mg/L SO_4^{2-} ; la estación P83 mostró la mayor concentración promedio de sulfato con un valor de 14,0mg/L SO_4^{2-} . Los valores de temperatura de las aguas subterráneas de la región norte del acuífero Tempisque se mantuvieron entre 28°C y 33°C. La estación P87 mostró la menor temperatura promedio; 29,5°C, y la estación P70 presentó la mayor temperatura promedio; 31,5°C.

Se llevó a cabo un análisis de componentes principales (ACP). ACP es un método de análisis de datos para la construcción de modelos lineales de múltiples variables a partir de conjuntos de datos complejos (Ouyang, 2005). El modelo ACP se desarrolla utilizando vectores ortogonales base (vectores propios), que se llaman componentes principales (Hanrahan & Lu, 2006; Ringnér, 2008). ACP es una técnica estadística de síntesis de la información o reducción de la dimensión (número de variables). A partir de una serie de datos con muchas variables, se pretende reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información. Los nuevos factores (también llamados componentes principales) son una combinación lineal de las variables originales y son independientes entre sí.

En el cuadro S2 (Apéndice Digital) se observa la matriz de correlaciones, donde los datos se relacionan en parejas, y se considera que estos se correlacionan cuanto más cercano este el valor a 1. Existen parámetros altamente relacionados; por ejemplo, la alcalinidad total–calcio que tiene un

valor de 0,958. Entre los parámetros que muestran una relación alta están alcalinidad total, conductividad, calcio, magnesio y dureza total. La Fig. 2 muestra el círculo de correlaciones que corresponde a una proyección de las variables iniciales sobre los dos primeros factores F1 y F2 (ejes factoriales). Los dos primeros ejes factoriales corresponden a un porcentaje elevado de la variabilidad, de manera que la representación sobre ellos corresponde al 53,71%, para este caso en particular.

Se emplearon diagramas de Piper para clasificar el agua subterránea (Fig. 4). Como cationes principales se consideraron calcio, magnesio, sodio y potasio; y como aniones principales cloruro, sulfato y bicarbonato. Se utilizó AquaChem 3.7 para trazar los diagramas de Piper. En el triángulo inferior izquierdo muestra los valores de concentración de los cationes para cada una de las estaciones y en el triángulo inferior derecho se pueden observar los valores de concentración para los aniones.

CUADRO 1

Caracterización fisicoquímica del agua subterránea tomada en el pozo P83 (n=4)

Análisis	Promedio	DS	Mín.	Máx.
Alcalinidad parcial (mg/L CO ₃ ²⁻)	2	0	2	2
Alcalinidad total (mg/L HCO ₃ ⁻)	208	2	206	210
Aluminio (mg/L)	0,0020	0,00	0,0020	0,0020
Antimonio (mg/L)	0,0048	0,00	0,0025	0,0118
Arsénico (mg/L)	0,0055	0,00	0,0029	0,011
Bromuro (mg/L)	0,32	0,00	0,32	0,32
Cadmio (mg/L)	0,00010	0,00	0,0001	0,0001
Calcio (mg/L Ca ²⁺)	37,6	0,8	36,5	38,2
Cloruros (mg/L)	5,6	2,6	3,1	9,3
Cobre (mg/L)	0,15	0,00	0,15	0,15
Conductividad (DS/cm)	381	41	348	440
Cromo (mg/L)	0,0014	0,00	0,0014	0,0014
Dureza total (mg/L CaCO ₃)	150,6	3,3	147,0	153,4
Estaño (mg/L)	0,0033	0,00	0,0027	0,0050
Hierro (mg/L)	0,093	0,00	0,093	0,093
Magnesio (mg/L Mg ²⁺)	13,7	0,8	12,5	14,4
Manganeso (mg/L)	0,045	0,00	0,045	0,045
Níquel (mg/L)	0,0010	0,00	0,001	0,001
Nitratos (mg/L NO ₃ ⁻)	8,4	9,5	2,8	22,6
pH (a 20,0 °C)	7,4	0,2	7,2	7,7
Plomo (mg/L)	0,0012	0,00	0,0012	0,0012
Potasio (mg/L)	3,2	0,3	2,8	3,4
Silicio (mg/L)	239,5	14,3	223,0	255
Sodio (mg/L)	15,9	4,1	11,8	21,6
SDT (mg/L)	298,8	19,0	278,8	320,5
Sulfatos (mg/L)	14,0	4,8	7,6	19,3
Temperatura (°C)	30,4	1,1	29,5	32
Zinc (mg/L)	0,091	0,00	0,091	0,091

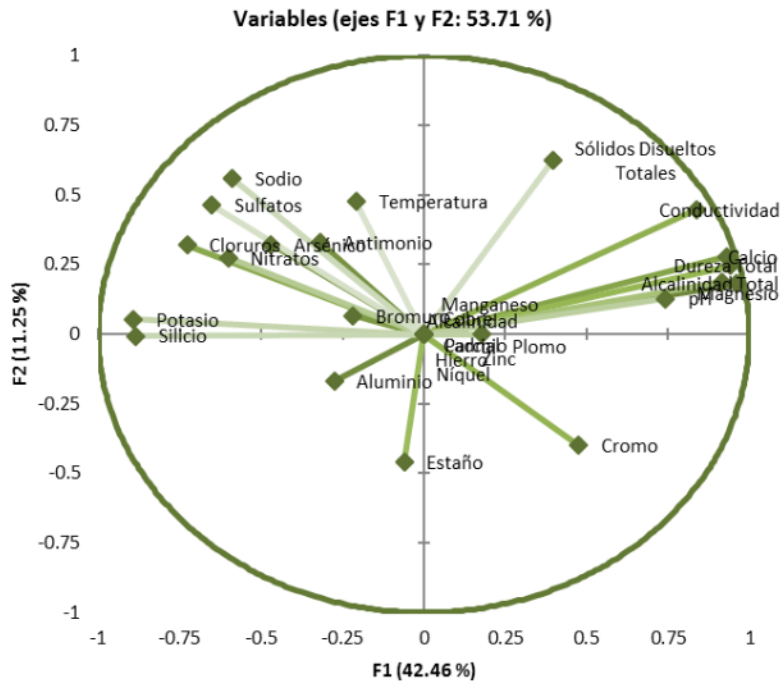


Fig. 2. Círculo de correlaciones de las variables fisicoquímicas iniciales, proyectadas sobre los dos primeros factores, F1 y F2.

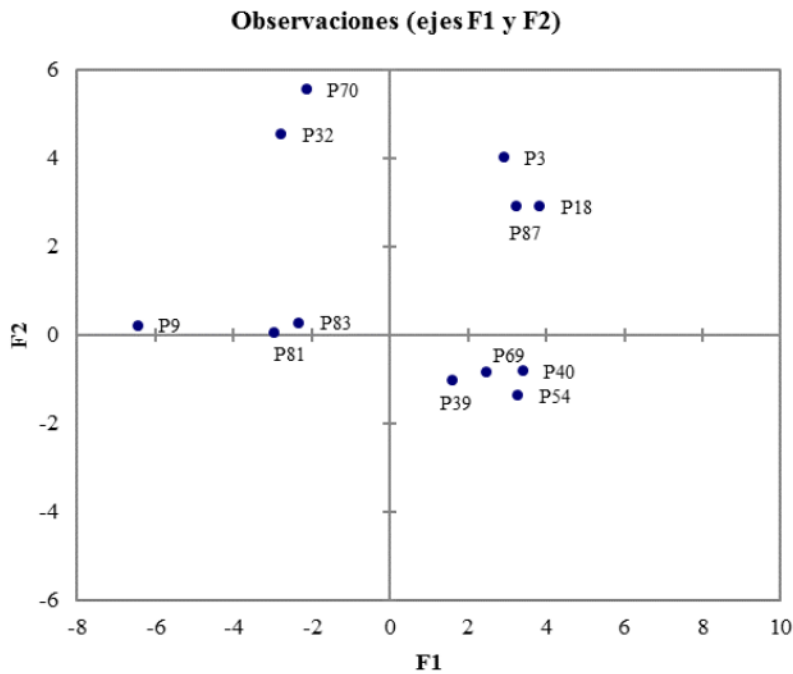


Fig. 3. Tendencias mostradas de acuerdo con el promedio de cada uno de los análisis fisicoquímicos para los 12 puntos de muestro de aguas subterráneas.

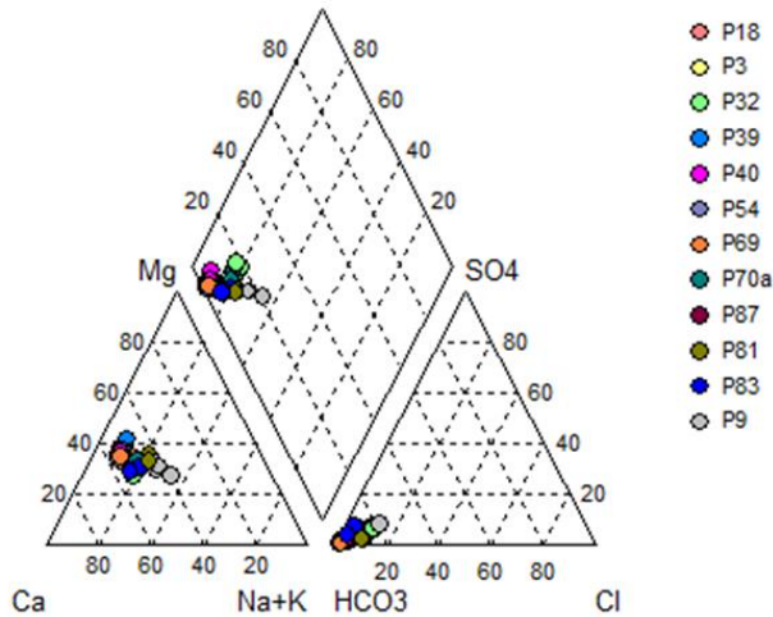


Fig. 4. Diagrama de Piper de las estaciones de muestreo de las aguas subterráneas de la región norte del acuífero Tempisque.

Además, como prueba confirmatoria se graficaron las concentraciones de calcio vs. bicarbonato para evaluar si existía una relación entre ambos iones. La Fig. 5 muestra que existe una relación lineal entre el HCO_3^- y el Ca^{2+} en las aguas subterráneas de los pozos, lo cual reafirma la clasificación hidrogeoquímica obtenida para todas las muestras de agua subterránea analizadas.

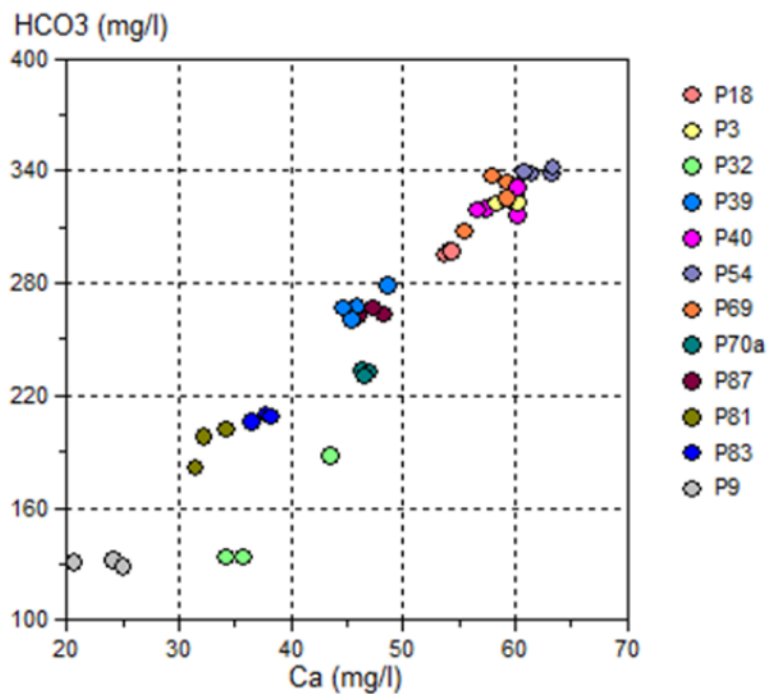


Fig. 5. Relación entre los iones calcio y bicarbonato en las aguas subterráneas de la región norte del acuífero Tempisque.

Resultados de análisis isotópicos: Los resultados de la evaluación de la huella isotópica del agua en las muestras recolectadas se presentan en el Cuadro 2.

CUADRO 2

Contenido isotópico promedio de las muestras de agua subterránea de la región norte del acuífero Tempisque y su elevación con respecto al nivel del mar

Pozo	Elevación (msnm)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
P83	10	-50,76	-7,24
P9	50	-48,29	-6,93
P32	19	-51,48	-7,04
P18	30	-51,20	-7,05
P39	48	-48,52	-7,07
P40	30	-49,84	-7,24
P54	55	-49,72	-7,39
P69	30	-49,14	-7,52
P81	20	-49,58	-7,06
P3	11	-39,82	-6,11
P70a	25	-49,03	-7,11
P87	49	-47,90	-7,08
LL2	60	-66,26	-10,02
LL2	60	-75,35	-10,19
LL1	23	-81,60	-10,96
LL1	23	-57,04	-8,17
LL1	23	-31,93	-5,18

La composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$) se relacionó con la elevación del sitio donde las muestras fueron recolectadas (Fig. 6) y se comparó con las líneas meteóricas local y global (Fig. 7).

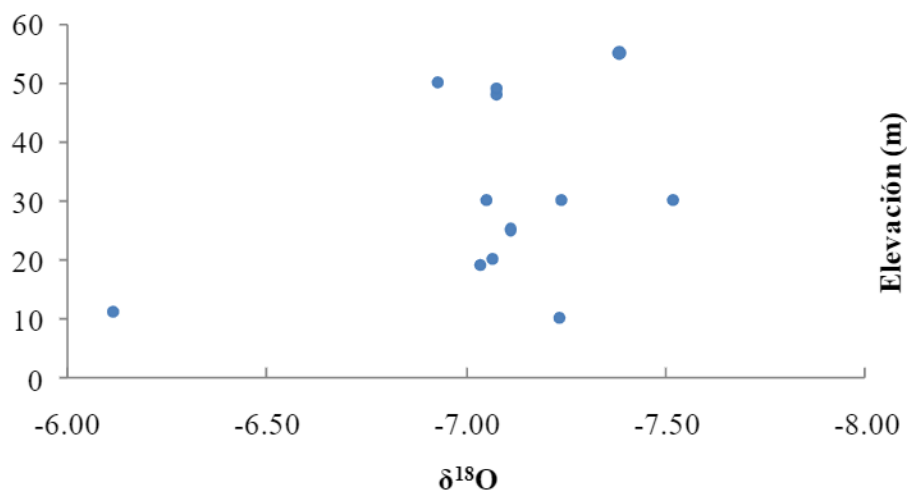


Fig. 6. Representación de la variación en el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ con respecto a la elevación, para la región norte del acuífero Tempisque.

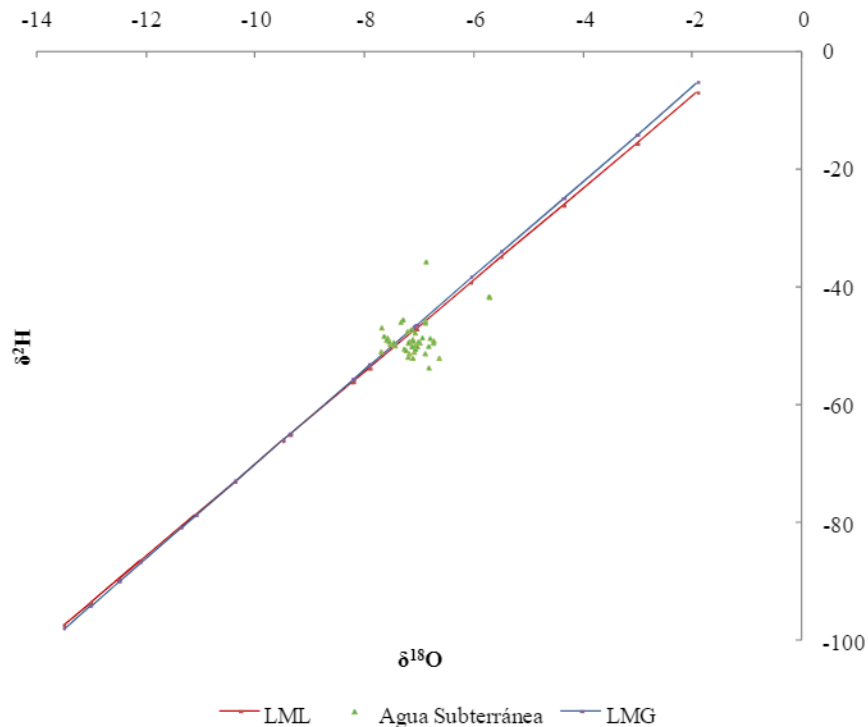


Fig. 7. Composición isotópica de las aguas subterráneas y de precipitación de la región norte del acuífero Tempisque. LML = $\delta^2\text{H} = 7,8 \delta^{18}\text{O} + 7,9$ (IAEA, 2019); LMG = Línea meteórica global = $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ (Craig, 1961).

DISCUSIÓN

Las disoluciones acuosas son eléctricamente neutras debido a que existe un equilibrio entre los cationes y aniones presentes. El balance iónico se basa en la diferencia de porcentajes entre los cationes y los aniones. Un balance iónico se considera aceptable cuando la diferencia es $\leq 5\%$ (APHA et al., 2005). Las muestras de agua subterránea presentaron balances iónicos aceptables ($\leq 5\%$). Las muestras de agua de lluvia presentaron balances iónicos superiores a 5% ya que al estar en contacto directo con la atmósfera pueden experimentar intercambio con el CO_2 atmosférico generando valores bajos de alcalinidad total.

La geología de la zona la constituyen rocas ígneas (e.g., diorita, basalto y gabro) ricas en calcio y en menor proporción en magnesio; y rocas sedimentarias (e.g., calizas) que están constituidas mayoritariamente por carbonato de calcio. Como es de esperar, estos minerales proveen calcio y magnesio al agua y son los responsables de la dureza del agua. En general, las aguas de esta región se pueden clasificar como duras y muy duras, aunque el agua subterránea del sitio P9 puede clasificarse como moderadamente suave. Por otro lado, la conductividad medida en estas aguas corresponde a valores bastante altos, lo que evidencia la disolución de los minerales presentes. Aunque la conductividad es relativamente alta, la clasificación de las aguas permanece como aguas dulces.

En cuanto a las concentraciones de nitratos, es importante señalar que el pozo P81 se encuentra ubicado en plantaciones de caña de azúcar y el pozo P70 se localiza muy cerca de cultivos de caña de azúcar (aunque no está destinado para riego). Estos dos pozos junto con el pozo P32 pueden deber estos valores elevados de nitrato a la presencia de fertilizantes nitrogenados. En el punto de muestreo P83, se observó un incremento en las concentraciones de nitrato en setiembre,

este pozo se localiza muy cerca de P32 y de plantaciones de caña de azúcar. Cuando se extrae agua del pozo P32, el pozo P83 se seca, lo que puede dar indicios de una relación entre ambos pozos dentro del acuífero, y también se ve afectado por el uso de fertilizantes.

El bicarbonato predomina en las aguas subterráneas de la región norte del acuífero Tempisque, ya que el pH se encuentra entre 4,5–8,0. Por otro lado, considerando que los sulfatos no son característicos de los minerales geológicos de la zona, se puede intuir que existe poca contaminación proveniente de fertilizantes sulfatados. En el acuífero predominan las rocas ígneas y sedimentarias, las primeras son ricas en silicatos tales como las peridotitas que pueden contener hasta un 90% de silicatos (Stumm & Morgan, 1996); las dioritas y gabros también poseen gran cantidad de silicatos, así como las rocas sedimentarias ftanitas y calizas silíceas afaníticas. Esto influye en las concentraciones altas de silicio medidas en todas las estaciones de muestreo.

Según el análisis estadístico, las variables alcalinidad total, dureza total, calcio, magnesio, conductividad y pH se hallan positiva y significativamente correlacionadas, ya que se encuentran agrupadas lejos del centro del círculo. Estos resultados concuerdan con la matriz de correlaciones donde el valor de r se aproxima a 1 (Cuadro S2 del Apéndice Digital). Al estar positivamente relacionadas, al aumentar una de las variables también lo hacen las que se correlacionan con ella, es decir, al aumentar la concentración de calcio, también aumenta la concentración de magnesio, bicarbonato y carbonato, así como el pH y la conductividad. Además, muestra que los datos agrupados en el centro del círculo no aportan variabilidad al sistema y, por tanto, se puede prescindir de estas variables para futuros estudios. Los pares de puntos P70–P32, P18–P87, y P81–P83 muestran comportamientos muy similares entre sí, por lo que para futuros estudios y con el fin de ahorrar recursos se puede tomar en cuenta solamente un punto de muestreo de cada pareja mostrada, ya que la química de sus aguas es similar; no obstante, se debe valorar características particulares del entorno de cada uno de los pozos para poder excluirlas. Es importante indicar que aunque los pozos P39, P40 y P69 aunque aparecen cercanos en la Fig. 3, geográficamente están muy separados. Las semejanzas en las características fisicoquímicas de sus aguas se pueden deber a que los sectores del acuífero Tempisque donde se ubican estos pozos tiene minerales similares.

Alrededor de un 80% de los cationes corresponden a Ca^{2+} mientras que un 20% corresponde a Mg^{2+} . El HCO_3^- abarca cerca del 100% de los aniones, por lo tanto, las aguas se pueden clasificar como bicarbonatada cálcica. Adicionalmente, se utilizaron índices hidrogeoquímicos (r) para determinar si existe intrusión salina en los pozos en estudio. Estos muestran los distintos tipos de relaciones existentes entre los iones disueltos en el agua e indican posible relación entre el terreno y el agua; características propias del agua o la acción de fenómenos modificadores (Pulido-Bosch, Tahiri, & Vallejos, 1999; Tomaszkiwicz, Abou Najm, & El-Fadel, 2014). Los valores se expresan en meq/L y se estiman dos en particular ($r\text{Mg}/r\text{Ca}$ y $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$). Para aguas continentales $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ varía entre 0,3 y 1,5; el agua de mar tiene valores alrededor de 5 (Pulido-Bosch et al., 1999; Tomaszkiwicz et al., 2014). El segundo índice $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$ es muy utilizado para determinar si existe evidencia de intrusión marina. Para aguas continentales se mantiene entre 0,1 y 5 mientras que para el agua de mar se encuentra entre 20 y 50 (Pulido-Bosch et al., 1999; Tomaszkiwicz et al., 2014). Los valores de índices hidrogeoquímicos obtenidos para los pozos en estudio indican que no existe ningún indicio de intrusión salina (Cuadro S3 del Apéndice Digital). La relación $r\text{Mg}/r\text{Ca}$ tuvo un valor máximo de 0,89 para el agua subterránea de la estación P81, en la segunda campaña de muestreo y el agua subterránea del punto P32 el mínimo en la tercera campaña de muestreo. La relación $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$ tuvo un valor máximo de 0,16 para P9, y P18 el mínimo, ambos en la primera campaña de muestreo.

Debido a que las diferencias en las altitudes entre puntos de muestreo en algunos casos son de pocos metros (el punto más bajo se ubica a 10msnm y el más alto a 55msnm), la composición isotópica del agua subterránea se mantuvo prácticamente constante. P3 en la segunda campaña



(setiembre 2010) mostró la mayor composición en $\delta^2\text{H}$, con un valor de -35,83 y este mismo punto, en la tercera campaña (octubre 2010), mostró la mayor composición en $\delta^{18}\text{O}$ con un valor de -5,72. El punto P3 se localiza a 11msnm y muy cerca del río Tempisque (Fig. 1). La estación P69 en la tercera campaña (octubre 2010) mostró la menor composición en $\delta^{18}\text{O}$, con valor de -7,69 y P18 en la segunda campaña (setiembre 2010) mostró la menor composición en $\delta^2\text{H}$ con un valor de -53,90. Tanto el punto P69 como el P18 se ubican a 30msnm. Las muestras de agua de lluvia presentaron grandes variaciones en el fraccionamiento isotópico, debido al régimen de lluvias entre mayo y noviembre del 2010, como se puede observar en el Cuadro 2 la desviación más negativa se dio en el mes de setiembre, uno de los meses con mayor precipitación. Para analizar el agua subterránea se utilizó la línea meteórica local determinada por el IAEA (IAEA, 2019).

De las 43 muestras de agua subterránea, 39 experimentan el efecto de evaporación y se encuentran por debajo de la LML (Fig. 7). Cuatro muestras (pozos P83, P40, P39 y P69) del total se encuentran por encima de la LML, lo cual indica que no se vieron tan afectadas por la evaporación y que posiblemente son pozos que se recargan con aguas meteóricas (Hunt, Coplen, Haas, Saad, & Borchardt, 2005). Estas muestras fueron recolectadas en el mes de setiembre, que fue el más lluvioso del año 2010 en la zona de estudio. Esta información en conjunto sugiere que las zonas de recarga de los pozos se encuentran a alturas similares, los únicos pozos que no siguen este comportamiento son P3 y P9, los cuales como se señaló con anterioridad, se localizan muy cerca del río Tempisque, y es posible que tengan algún tipo de recarga proveniente del río.

Los resultados obtenidos del análisis físico-químico de las aguas subterráneas de la región norte del acuífero Tempisque permiten concluir que éstas se comportan como aguas del tipo bicarbonatadas cálcicas. Utilizando los índices hidrogeoquímicos se demostró que no existe evidencia de intrusión salina. Además, la composición isotópica se mantuvo bastante constante para las aguas subterráneas, excepto en los puntos P3 y P9 que mostraron valores más positivos en la composición de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Estos puntos tienen gran influencia de las aguas del río Tempisque. El punto P69 mostró la menor composición en $\delta^{18}\text{O}$, con valor de -7,69 y el punto P18 la menor composición en $\delta^2\text{H}$ con un valor de -53,90; los puntos P69 y P18 se ubican a 30msnm.

Los resultados de este estudio nos permitieron establecer que las zonas de recarga de los pozos se encuentran a alturas similares. Además, considerando el régimen de lluvias durante el tiempo de estudio se concluye que al menos cuatro pozos muestran recarga por aguas meteóricas. La totalidad de las aguas subterráneas de los pozos estudiados evidencian el proceso de evaporación (se relaciona con el clima seco predominante de la zona), y concuerda con lo reportado en la literatura. Las muestras de agua de lluvia presentan variaciones significativas en el fraccionamiento isotópico, debido al régimen de lluvias que se presentó entre mayo y noviembre del 2010. Debido al escaso número de datos isotópicos de precipitación obtenidos y al bajo relieve que presenta la zona, no se pudo establecer una tendencia clara en la composición isotópica con respecto a la altitud.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica (Proyecto 802-BO-513). Al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Escuela Centroamericana de Geología y Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento por el apoyo brindado, al Organismo Internacional de Energía Atómica en el marco del Proyecto COS 8/010 "Manejo Sostenible del Acuífero tempisque, Región Norte".



REFERENCIAS

- APHA, AWWA, & WEF. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (20th ed.). Washington, DC, USA: American Public Health Association.
- Arias Salguero, M. E., Losilla Penón, M., & Arredondo Li, S. (2006). Estado del conocimiento del agua subterránea en Costa Rica. *Boletín Geológico y Minero*, 117(1), 63–73.
- Calvo, J. C. (1990). Water resources development in Costa Rica 1970–2000. *Hydrological Sciences Journal*, 35(2), 185–196. DOI: 10.1080/02626669009492417
- Craig, H. (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465), 1702–1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.1702
- Cuadrado Quesada, G. (2017). Gobernanza de aguas subterráneas, conflictos socioambientales y alternativas: experiencias en Costa Rica. *Anuario de Estudios Centroamericanos*, 43, 393. DOI: 10.15517/aeca.v1i1.28852
- Fathmawati, F., Fachiroh, J., Sutomo, A. H., & Putra, D. P. E. (2018). Origin and distribution of nitrate in water well of settlement areas in Yogyakarta, Indonesia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(11). DOI: 10.1007/s10661-018-6958-y
- Gómez Cruz, A., & Arredondo, S. (1994). Hidrología isotópica del Valle del río Tempisque, Provincia de Guanacaste, Costa Rica. In IAEA (Ed.), *Estudios de hidrología isotópica en América Latina 1994* (pp. 119–138). Vienna, Austria: IAEA.
- Hanrahan, G., & Lu, K. (2006). Application of Factorial and Response Surface Methodology in Modern Experimental Design and Optimization. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 36(3–4), 141–151. DOI: 10.1080/10408340600969478
- He, L. M., Lu, J., & Shi, W. (2007). Variability of fecal indicator bacteria in flowing and ponded waters in southern California: Implications for bacterial TMDL development and implementation. *Water Research*, 41(14), 3132–3140. DOI: 10.1016/j.watres.2007.04.014
- Hunt, R. J., Coplen, T. B., Haas, N. L., Saad, D. A., & Borchardt, M. A. (2005). Investigating surface water–well interaction using stable isotope ratios of water. *Journal of Hydrology*, 302(1–4), 154–172. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.07.010
- IAEA. (2019). *Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) | IAEA*. Retrieved from <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>
- Jiménez R., J. A., & González J., E. (2001). *La Cuenca del Río Tempisque: Perspectivas para un Manejo Integral*. San José, Costa Rica.
- Kasambala Donga, T., & Eklo, O. M. (2018). Environmental load of pesticides used in conventional sugarcane production in Malawi. *Crop Protection*, 108(January), 71–77. DOI: 10.1016/j.cropro.2018.02.012
- Kemper, N. (2008). Veterinary antibiotics in the aquatic and terrestrial environment. *Ecological Indicators*, 8(1), 1–13. DOI: 10.1016/j.ecolind.2007.06.002
- Kuzdas, C. (2012). *Unpacking water conflict in Guanacaste, Costa Rica*. Global Water Forum. Retrieved from <http://www.globalwaterforum.org/2012/10/16/unpacking-?-water-?-conflict-?-in-?-guanacaste-?-costa-?-rica/>
- Lachniet, M. S., & Patterson, W. P. (2002). Stable isotope values of Costa Rican surface waters. *Journal of Hydrology*, 260(1–4), 135–150. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00603-5
- Mende, A., Astorga, A., & Neumann, D. (2007). Strategy for groundwater management in developing countries: A case study in northern Costa Rica. *Journal of Hydrology*, 334(1–2), 109–124. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.10.016



- Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12), 2621–2635. DOI: 10.1016/j.watres.2005.04.024
- Pulido-Bosch, A., Tahiri, A., & Vallejos, A. (1999). Hydrogeochemical characteristics of processes in the Temara aquifer in northwestern Morocco. *Water, Air, and Soil Pollution*, 114(3–4), 323–337. DOI: 10.1023/A:1005167223071
- Reynolds-Vargas, J., Fraile-Merino, J., & Hirata, R. (2006). Trends in Nitrate Concentrations and Determination of its Origin Using Stable Isotopes (18O and 15N) in Groundwater of the Western Central Valley, Costa Rica. *Ambio*, 35(5), 229–236. DOI: 10.1579/05-R-046R1.1
- Ringnér, M. (2008). What is principal component analysis? *Nature Biotechnology*, 26(3), 303–304. DOI: 10.1038/nbt0308-303
- Saunders, J. A., Mohammad, S., Korte, N. E., Lee, M. K., Fayek, M., Castle, D., & Barnett, M. O. (2006). Groundwater geochemistry, microbiology, and mineralogy in two arsenic-bearing holocene alluvial aquifers from the United States. *ACS Symposium Series*, 915, 191–205. DOI: 10.1021/bk-2005-0915.ch014
- Scherer, M. M., Richter, S., Valentine, R. L., & Alvarez, P. J. J. (2000). Chemistry and microbiology of permeable reactive barriers for in situ groundwater clean up. *Critical Reviews in Microbiology*, 26(4), 221–264. DOI: 10.1080/10408410091154237
- Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA). (2010). *Dirección de Investigación y Gestión Hídrica: Listado de Pozos para la Provincia de Guanacaste*. DIGH-SENARA, Costa Rica. Retrieved from <http://base-digh.Senara.or.cr/usuarios/ueXSenara/admin/lprovcanton.php?b=2>
- Socki, R. A. (1999). On-line technique for measuring stable oxygen and hydrogen isotopes from microliter quantities of water. *Analytical Chemistry*, 71(11), 2250–2253. DOI: 10.1021/ac981140i
- Solano-Quintero, J., & Villalobos-Flores, R. (2001). Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfica climática de Costa Rica. *Tópicos meteorológicos y Oceanográficos*, 8(1), 26–39.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters*. New York: A Wiley-Interscience Publication.
- Swartjes, F. A., Rutgers, M., Lijzen, J. P. A., Janssen, P. J. C. M., Otte, P. F., Wintersen, A., ... Posthuma, L. (2012). State of the art of contaminated site management in The Netherlands: Policy framework and risk assessment tools. *Science of The Total Environment*, 427–428, 1–10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.02.078
- Tomaszkiewicz, M., Abou Najm, M., & El-Fadel, M. (2014). Development of a groundwater quality index for seawater intrusion in coastal aquifers. *Environmental Modelling and Software*, 57, 13–26. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.03.010
- Townley, L. R., & Trefry, M. G. (2000). Surface water-groundwater interaction near shallow circular lakes: Flow geometry in three dimensions. *Water Resources Research*, 36(4), 935–948. DOI: 10.1029/1999WR900304
- Valverde, R. (2013). Disponibilidad, distribución, calidad y perspectivas del agua en Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 45(1), 5–12. DOI: 10.15359/rca.45-1.1
- Velasco, A., Rodríguez, J., Castillo, R., & Ortíz, I. (2012). Residues of organochlorine and organophosphorus pesticides in sugarcane crop soils and river water. *Journal of Environmental Science and Health - Part B Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 47(9), 833–841. DOI: 10.1080/03601234.2012.693864
- Wang, J., He, J., & Chen, H. (2012). Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. *Science of the Total Environment*, 432, 216–226. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.005

