

Características físicas, químicas y microbiológicas del agua subterránea en Los Chiles, Costa Rica, y su asociación con el uso del suelo

Paola Fuentes-Schweizer¹ , Eric Morales Mora² , Rigoberto Vargas Muñoz³ , Kenia Barrantes Jiménez² 
 & Luz Chacón Jiménez² 

1. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Básicas, Escuela de Química, Centro de Investigaciones en Electroquímica y Energía Química, San José, Costa Rica; paola.fuentes@ucr.ac.cr
2. Universidad de Costa Rica, Instituto de Investigaciones en Salud, San José, Costa Rica; eric.morales@ucr.ac.cr; kenia.barrantes@ucr.ac.cr; luz.chacon@ucr.ac.cr
3. Universidad de Costa Rica, Facultad de Ciencias Básicas, Escuela de Geología, San José, Costa Rica, rigoberto.vargasmunoz@ucr.ac.cr

Recibido 25-X-2022 ■ Corregido 18-II-2023 ■ Aceptado 20-IV-2023

DOI: <https://doi.org/10.22458/urj.v15i2.4656>

ABSTRACT. “Physical, chemical, and microbiological characteristics of groundwater in Los Chiles, Costa Rica, and its association with land use”. **Introduction:** Los Chiles has one of the lowest Social Progress Indexes in Costa Rica. The inhabitants drink untreated groundwater from an aquifer across the Nicaragua-Costa Rica border. **Objective:** To characterize water quality and possible associations with land use. **Methods:** We collected six water samples from wells during the dry and rainy seasons in 2019 and applied standard tests. **Results:** Grasslands and bare ground cover larger areas than other land uses. The water is calcic-bicarbonate type, and its physical-chemical values are acceptable, we did not detect *Escherichia coli* in any sample, while we only detected fecal coliforms in La Trocha. **Conclusion:** If treated to eliminate coliforms and protected from other effects of human activity, this water will be optimal for human consumption.

Keywords: groundwater, environmental health, waterborne diseases, hydric resource.

RESUMEN. Introducción: Los Chiles tiene uno de los índices de progreso social más bajos de Costa Rica. Los habitantes beben agua subterránea no tratada de un acuífero que atraviesa la frontera entre Nicaragua y Costa Rica. **Objetivo:** Caracterizar la calidad del agua y posibles asociaciones con el uso de la tierra. **Métodos:** Recolectamos seis muestras de agua de pozos durante las temporadas seca y lluviosa en 2019 y aplicamos pruebas estándar. **Resultados:** Los pastizales y el suelo descubierto cubren áreas más grandes que otros usos del suelo. El agua es del tipo calcio-bicarbonato, y sus valores físico-químicos son aceptables, no detectamos *Escherichia coli* en ninguna muestra, mientras que coliformes fecales sólo en La Trocha. **Conclusión:** Si se trata para eliminar los coliformes y se protege de otros efectos de la actividad humana, esta fuente será óptima para el consumo humano.

Palabras clave: agua subterránea, salud ambiental, enfermedades transmitidas por el agua, recurso hídrico.

El acceso al agua potable es uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 planteados por la Organización de Naciones Unidas (Organización de Naciones Unidas [ONU], 2015), esta organización señala que, si no se hace un cambio con respecto al manejo de este recurso, se espera que para el 2050 el 25% de la población mundial viva en países afectados por la escasez crónica y reiterada de agua dulce (ONU, 2015). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, el agua potable es aquella que se utiliza para consumo y quehaceres domésticos, es inocua para el ser humano y debe cumplir con una serie de criterios que garanticen su seguridad (World Health Organization [WHO], 2017).

En Costa Rica se realizó una sistematización de las fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano doméstico, basada en el Censo de Población y Vivienda 2011, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC); el cual mostró que el abastecimiento puede incluir desde acueductos administrados por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), hasta acueductos rurales, pozos, ríos, quebradas o nacientes, lluvias u otros según se indica en el Programa Estado de la Nación Costa Rica, apartado 4, del 15 de noviembre de 2016 (Programa Estado de la Nación [PEN], 2016). De acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Energía (Dirección de Agua, 2021) el consumo de agua costarricense en zonas rurales puede llegar a los 200L/persona/día.

Las poblaciones rurales suelen tener más vulnerados sus estilos de vida, como por ejemplo la cobertura de las necesidades básicas (Salas-Acuña, 2018; Datta et al., 2022); particularmente, las zonas rurales fronterizas pueden ser espacios de conflicto, tensión y disputa; así como zonas abandonadas y relegadas a un rol de seguridad y defensa del territorio (Morales et al., 2010). El cantón de Los Chiles, Costa Rica, donde se desarrolla este estudio, se encuentra en la región Huetar Norte y es una comunidad rural fronteriza entre Costa Rica y Nicaragua; se ubica en el primer quintil del índice de progreso social en Costa Rica, entre los cantones de menor progreso social, bienestar y cobertura de necesidades básicas; lo cual implica menor acceso a servicios básicos de salud, agua para consumo y saneamiento (Sánchez, 2018). Además, desde el año 2010 presenta un aumento sostenido de su coeficiente de Gini (mayor al 0,50), posicionándose entre las regiones más desiguales del país, según el Programa Estado de la Nación Costa Rica, apartado 2, del 15 de noviembre de 2016 (PEN, 2016). En Costa Rica, según el índice de desarrollo distrital, de los 484 distritos, el distrito de Los Chiles se ubica en la posición 428 lo cual lo ubica en la zona de muy bajo desarrollo (Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica de Costa Rica [MIDEPLAN], 2018). Estas condiciones muestran la vulnerabilidad de la población de Los Chiles para satisfacer sus necesidades básicas como el acceso y mantenimiento del recurso hídrico, por lo cual, la existencia de datos en esta región resulta de suma importancia para la toma de decisiones y mejora de las condiciones de vida de su población. Aunado a ello, el cantón es la zona fronteriza Costa Rica-Nicaragua, con mayor densidad de personas nicaragüenses (Morales et al., 2010), lo cual posiciona a la mano de obra de extranjeros como un recurso valioso para el funcionamiento de las actividades agrícolas, y ante un débil aparato administrativo se facilita la vulnerabilidad de los derechos humanos fundamentales de estos migrantes (Lessmann & Steinkraus, 2019).

La principal fuente de agua de la zona es la cuenca del Río San Juan (Nicaragua-Costa Rica), donde se utiliza agua superficial y agua subterránea para suplir las necesidades de agua potable. En general el manejo de acuíferos transfronterizos representa un reto, en especial en zonas de conflicto o socioeconómicamente vulnerables (Varady et al., 2020). Otra característica que convierte a Los Chiles en una zona de urgente estudio es el mal manejo de las aguas residuales y el uso de suelo. El Informe Estado de la Nación en desarrollo humano sostenible, descrito en el Estado de la Nación Costa Rica, apartado 2, del 15 de octubre de 2019 (Programa Estado de la Nación [PEN], 2019), menciona que el uso de pozo negro o letrina en el país es poco común, solo el 1,4% de las viviendas cuentan con uno. Sin embargo, en la zona de estudio el uso de letrina es muy frecuente, aproximadamente un 60% de las viviendas lo utilizan.

Adicionalmente, los acuíferos de la zona se encuentran bajo estrés debido a los cultivos extensivos que según Barrantes y Sandoval (2016) abarcan el 29,2 % de la superficie de la Zona Norte y se encuentran distribuidos en las zonas de baja pendiente; la piña, la yuca y el frijol se encuentran dentro de los cultivos anuales predominantes; los cultivos permanentes característicos son los cítricos y la caña de azúcar (Barrantes & Sandoval, 2016). Además, el cultivo de piña ha incrementado el número de empleos en la zona, mientras que a nivel ambiental se observa un incremento en la cantidad de suelo expuesto y la utilización de productos químicos; estas situaciones pueden aumentar el riesgo de contaminación de fuentes de agua.

Costa Rica cuenta con legislación que garantiza la calidad del agua potable, así como la frecuencia en que deben realizarse análisis que respalden la idoneidad del recurso. A grandes rasgos, la legislación costarricense se estructura en cuatro niveles, el nivel uno incluye los parámetros más básicos, el segundo y tercer nivel incluye metales y sustancias potencialmente tóxicas, y, por último, el nivel cuatro incluye parámetros exclusivos de riesgo particular para la zona, como plaguicidas o microorganismos causantes de brotes (Decreto Ejecutivo N°38924-S, 2015). Sin embargo, estos análisis tienen un costo económico elevado, lo cual dificulta que puedan realizarse en zonas con recursos económicos limitados. Adicionalmente, la legislación obliga a realizar inspecciones sanitarias periódicas a las fuentes de abastecimiento, a pesar de ello, muchas comunidades de la zona utilizan pozos perforados para consumo propio, los cuales no se encuentran bajo el control de calidad del Ministerio de Salud.

Debido a la problemática expuesta sobre la Zona Norte y siendo de particular interés el acuífero transfronterizo del río San Juan, el objetivo de este trabajo fue establecer la calidad de agua del acuífero según los parámetros para consumo humano, para discriminar si hay algún efecto por el uso de suelo, con el fin de recomendar medidas relacionadas con la protección del recurso que puedan aplicar las comunidades usuarias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción uso de suelo: La zona de estudio se ubica en la parte baja de la Gran Cuenca del Río San Juan (Costa Rica-Nicaragua), con un área de 19,77km², al norte del cantón de Los Chiles, Costa Rica. Los datos fueron obtenidos del proyecto Landsat-8 de la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov>), se utilizaron las imágenes satelitales para generar composiciones espectrales, facilitando el reconocimiento de patrones de uso de suelo, en este estudio se utilizaron las composiciones de color natural e infrarrojo cercano-infrarrojo de onda corta-rojo (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2010). La delimitación del uso de suelo se realizó utilizando aprendizaje automático supervisado con el algoritmo de clasificación por el método de estimación de máxima verosimilitud (Solano et al., 2019) (ESRI, 2010). Para ello, se utilizaron las siguientes funciones de ArcGIS 10.7 (ESRI software): clasificación de imágenes, tabulación de área, calculadora de campo; la función de buffer fue utilizada para la delimitación de las zonas aledañas a los pozos, donde se definió un radio de 50m desde el pozo. La depuración de los datos y la generación de gráficos fue realizada en el programa R (cran.r-project.org) utilizando los paquetes dplyr (dplyr.tidyverse.org) y ggplot2 (ggplot2.tidyverse.org) (Wickham, 2016).

Muestreo: Se realizaron dos muestreos, uno en época seca y uno en época lluviosa, en el periodo de abril a octubre de 2019. Se seleccionaron cinco comunidades fronterizas del cantón de Los Chiles, provincia de Alajuela, Costa Rica, las cuales se identifican en la Fig. 1 de la siguiente manera: La Trocha (A), Isla Chica (B), Combate (C), Cachito (D) y Punta Cortés (E). En cada una de esas comunidades se tomó una muestra de agua en el(los) pozo(s) principal(es) de la comunidad. La toma de la muestra fue de tipo simple instantánea. Se tomó un litro de agua en botellas de vidrio ámbar para análisis de plaguicidas y 500ml en botellas de polietileno de alta densidad para análisis físico-químico completo, los análisis efectuados se detallan en la siguiente sección. Todas las muestras se conservaron a una temperatura entre 0°C y -5°C.

Además, en los pozos se tomaron muestras de 400mL de agua en botellas ámbar estériles para la determinación de coliformes fecales y *Escherichia coli*. Las muestras fueron transportadas al laboratorio de Aguas y Alimentos del Instituto de Investigaciones en Salud (INISA) de la Universidad de Costa Rica, a una temperatura entre 4°C y 8°C y procesadas en menos de 36 horas.

Análisis físicos y químicos: Se realizaron análisis físico-químicos básicos denominados N1 por la legislación costarricense en todas las muestras tomadas. Este perfil incluye: color aparente, conductividad, pH, olor, sabor, temperatura, turbiedad y cloro residual libre; las muestras se analizaron según la metodología del Standard Methods of Examination Water and Wastewater (SMEWW) descrita por APHA (Bridgewater, 2017): pH (método 4500-H+ B), conductividad (método 2510 B), color (método 5310 B), cloro (método 4110-B). La determinación de temperatura y cloro residual se realizaron *in situ*, todos los demás análisis se realizaron en el Instituto de Investigaciones en Salud (INISA), de la Universidad de Costa Rica.

Al agua obtenida de los pozos perforados también se les realizó un perfil físico-químico extendido que incluyó análisis de aluminio, calcio, cloruro, hierro, magnesio, manganeso, potasio, sodio, sulfatos, nitratos, fósforo, alcalinidad, zinc, amonio, nitrógeno ureico y azufre total. Este perfil se realizó en los laboratorios del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), el Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química (CELEQ) de la Universidad de Costa Rica siguiendo la metodología del SMEWW descrita por APHA (Bridgewater, 2017): Alcalinidad total y parcial Método 2320B, metales por ICP Método 3120 y metales por FAAS Método 3111B, nitrógeno amoniacal se determinó según el procedimiento descrito en Tucker (Tucker, 2007). Por otro lado, el nitrato se determinó según el método descrito por Bogren y Pruefer (Bogren & Pruefer, 2008) y el nitrógeno ureico se determinó según el método descrito por Nelson (Nelson, 2008), estos tres métodos utilizan la técnica de colorimetría con el analizador de Inyección de Flujo (FIA).

Adicionalmente, en el agua de los pozos analizamos los plaguicidas organoclorados: Alfa-BHC, Lindano, Beta-BHC, Delta-BHC, Heptaclor, Aldrín, Heptaclor epóxido, Gama-clordano, Alfa-clordano, Endosulfan alfa, Endosulfan beta, Endosulfan sulfato, Dieldrín, Endrín, Endrín aldehído, DDT, Metoxiclor, Clorotalonil, Hexaclorobenceno, Vinclozólín; los plaguicidas organofosforados: Forato, Dimetoato, Disulfotón, Metil Paratión, Paratión, Clorpirifos, Clorpirifos metil, Coumafos, Diazinón, Diclorvos, Etión, Fenamifos, Isofenfos, Malatión, Terbufos y los plaguicidas tipo carbamatos: Aldicarb, Carbaril, Carbofuran, Metiocarb, Metomil, Oxamil, Propoxur. Estos análisis los realizamos en el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica de la siguiente manera: los análisis de organoclorados y organofosforados se realizaron de acuerdo con los métodos Multiresidue Methods (modificados) del P.A.M. 3er Edición, Extracción en fase sólida (SPE), Cromatografía de Gases-Masas (Food and Drug Administration [FDA], 1994). Procedimientos técnicos de Química (PT-CR); los análisis de carbamatos fueron realizados de acuerdo con los métodos Multiresidue Methods (modificados) del P.A.M. 3er Edición Extracción en fase sólida (SPE), Cromatografía de HPLC con detector de arreglo de diodos.

Análisis microbiológicos: La cuantificación de coliformes fecales y *Escherichia coli* se realizó mediante la técnica de fermentación de tubos múltiples, de acuerdo con los métodos 9221E, 9221F y 9230B, respectivamente, descritos por APHA (Bridgewater, 2017).

Análisis de la información: Para analizar relaciones entre las variables se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, para facilitar su visualización se aplicó el algoritmo del paquete corrplot (Wei & Simko, 2017) y se generaron mapas de calor donde se resaltaron los coeficientes de correlación significativos ($p < 0,05$). Para clasificar el tipo de agua subterránea, se generó un diagrama de Piper (diagrama triangular), (Wickham, 2016), con el paquete ggplot2. Ambos paquetes del programa estadístico R.

RESULTADOS

Análisis espacial: En la zona de estudio (Fig. 1) hay una distribución mixta del uso de suelo, encontrándose predominantemente uso pastoril (29,29%), seguido del forestal (20,05%); mientras tanto, el uso menos frecuente son las edificaciones (1,16%). El cultivo con la mayor área en la zona es la naranja (18,12%), seguido del cultivo de piña (8,47%). Asimismo, se observa un 13,03% de suelo desnudo, este uso se encuentra predominantemente en las zonas aledañas a los cultivos ya mencionados, principalmente de piña. El humedal de Medio Queso cubre un 9,88% de la zona en estudio, este resulta particular, puesto que delimita la zona rural de la urbana, de la zona agraria y pastoril.

En términos generales se observa que los cultivos de piña y naranja se encuentran entremezclados con el suelo desnudo y el uso forestal. Además, no se observa una delimitación marcada entre las zonas agrícolas y los asentamientos humanos, donde se encuentran los centros de población colindantes con el cultivo de piña principalmente. Por tanto, no se aprecia un patrón ordenado de crecimiento agrícola, ni protección de las zonas forestales y poblaciones humanas.

Con respecto a los usos de suelo en la zona de amortiguamiento de los pozos, en todos los casos se encuentran edificaciones dentro del área de protección, variando entre el 5,2% (Punta Cortés 2 -F-) y 41,2% (Isla Chica -B-). Asimismo, el uso forestal y suelo desnudo presentan en promedio 19,2% y 36,3%, respectivamente, con excepción de Cachito que no presenta estos usos. El uso de pasto presenta la mayor variación entre los pozos: 7,3% (Combate -C-) y 65,1% (Cachito -D-). En el caso de Combate, se encuentra que un 20,1% del uso de suelo corresponde al cultivo de piña, siendo el único pozo que tiene cultivos en la zona de amortiguamiento. La presencia de estas actividades en las zonas aledañas a los pozos aumenta la vulnerabilidad de contaminación de estos, principalmente por materia fecal y agroquímicos, incrementando el riesgo de perjuicios a la salud y el bienestar humano.

Análisis del suelo y la calidad de agua: A partir de las muestras tomadas en los seis pozos estudiados se evaluó la calidad del agua de la zona, utilizando como referencia los parámetros contemplados en el Nivel 1 del Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto Ejecutivo N°38924-S, 2015), puesto que las comunidades utilizan estos pozos como fuente de agua de consumo. En la Tabla 1 en Apéndice, se observan los resultados obtenidos, siendo conductividad (34-225 μ S/cm) y turbidez (0,07-8,96UNT) los parámetros que presentan la mayor variación. El Pozo 2 en Punta Cortés es el que presenta valores menores de conductividad y de pH.

Los resultados de los análisis de las variables fisicoquímicas adicionales realizados a los pozos, se muestran en dos tablas, los iones mayores en la Tabla 2 en Apéndice, y otras sustancias químicas en la Tabla 3 en Apéndice, los parámetros que presentan mayor variación son calcio (1,2-17,5mg/L), sodio (3,0-47,8mg/L), y alcalinidad (9,6-138,4mg/L), todos estos parámetros están relacionados con el tipo de material que forma el suelo y el acuífero (Prakash et al., 2020), pero también se relacionan con el tiempo transcurrido desde la infiltración del agua (Madrigal-Solís et al., 2017; Adimalla & Venkatayogi, 2018), hasta su extracción por bombeo.

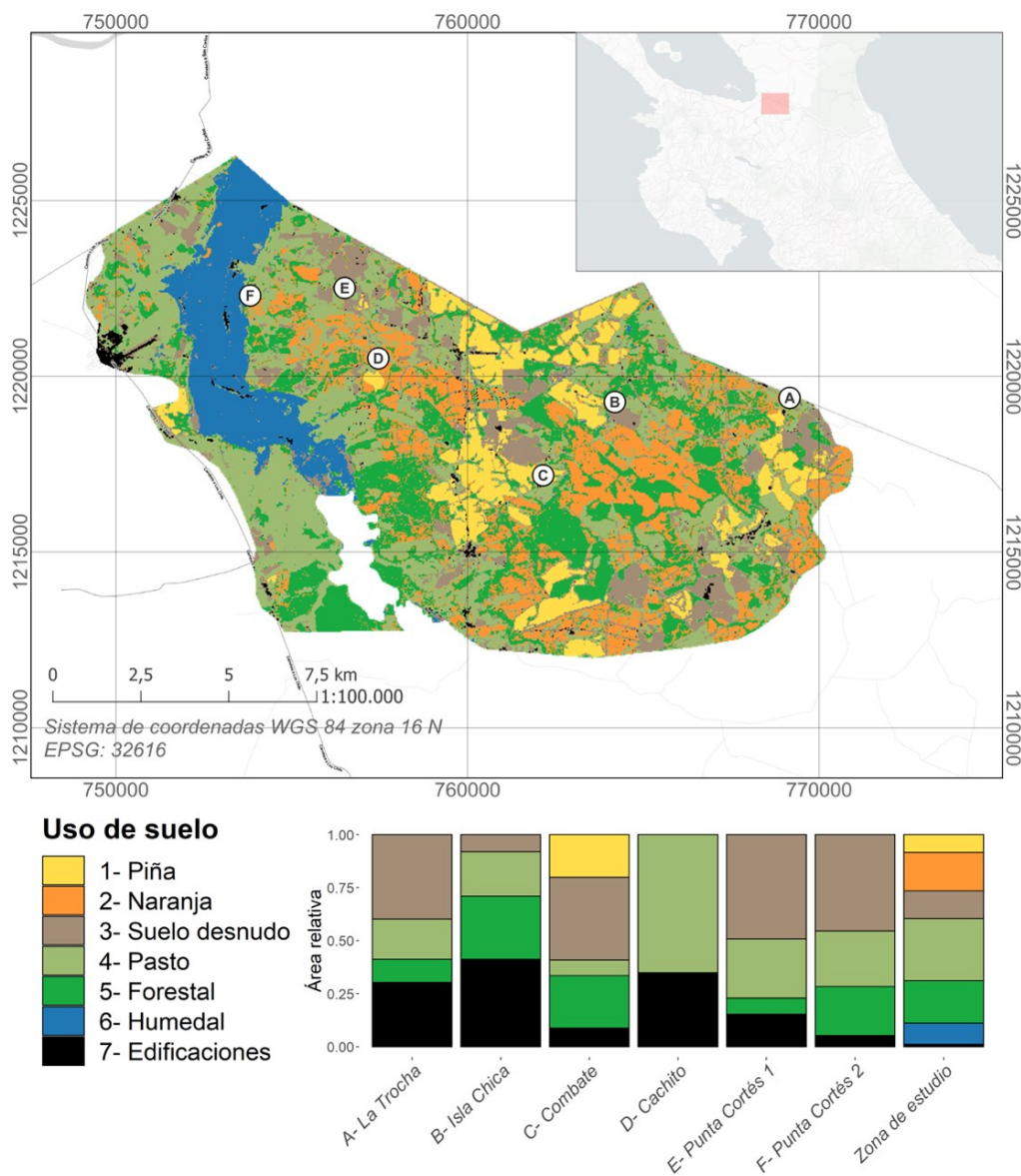


Fig. 1. Arriba - Uso de suelo de la parte baja de la Gran cuenca del Río San Juan en Costa Rica. Abajo: Área relativa de uso de suelo en la zona de amortiguamiento (radio de 50m) de los pozos en estudio y en el área total de estudio.

De acuerdo con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto N°38924-S, 2015) los valores determinados para los iones calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruro, sulfato, bicarbonato, carbonato y nitrato se encuentran por debajo de límite máximo permitido (Tablas 1, Tabla 2).

Las diferencias en la calidad del agua subterránea se observan en el diagrama de Piper mostrado en la Fig. 2 a continuación:

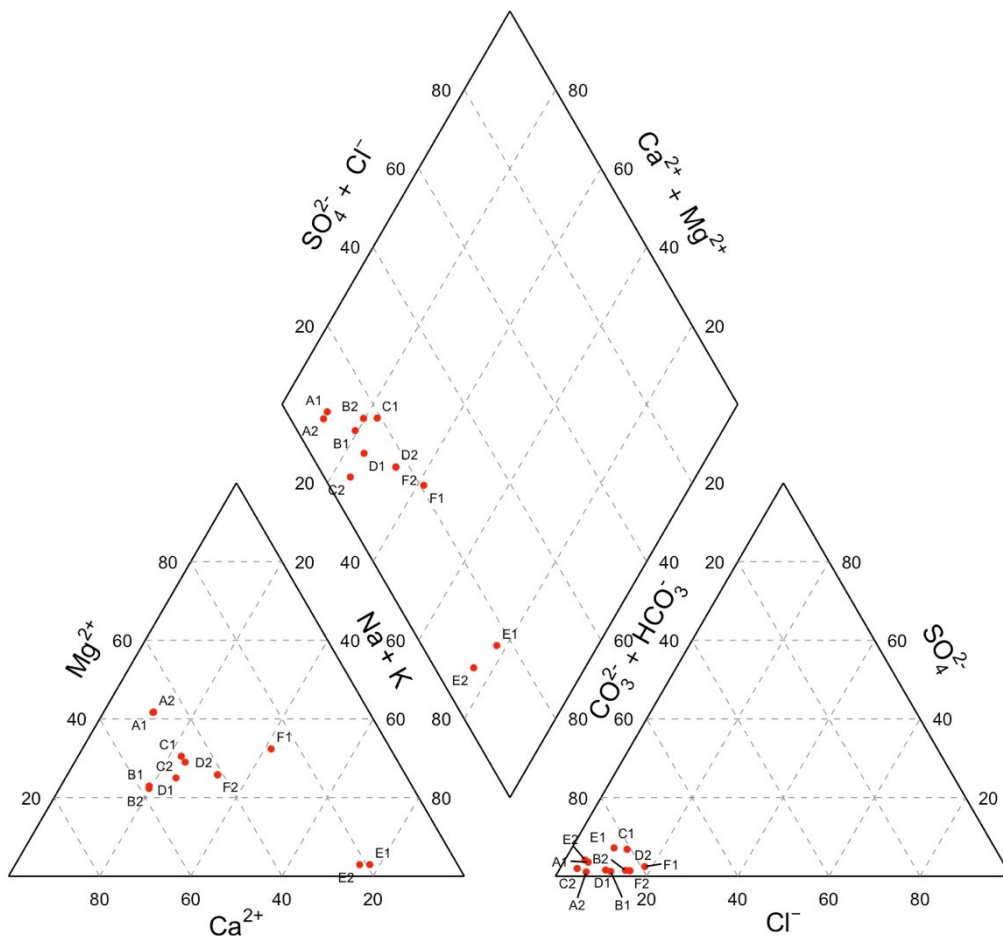


Fig. 2. Diagrama de Piper para establecer el tipo de agua subterránea de las muestras.

*Identificación de pozos: A La Trocha; B Isla Chica; C Combate; D Cachito; E Punta Cortés 1; F Punta Cortés 2. La época seca se representa con un 1 (abril-2019) y la época lluviosa con un 2 (octubre 2019).

En los pozos del área de estudio, predomina la presencia del catión calcio seguido del magnesio y del anión bicarbonato, los contenidos de sulfato en general son bajos, salvo en el pozo Punta Cortés 1. Los contenidos de cloruro son bajos para todos los sitios de muestreo. Esto clasifica las aguas como tipo bicarbonatadas-cálcica.

Para estudiar las correlaciones entre variables se realizó un gráfico de correlación tipo *heatmap* que se muestra en la Fig. 3.

Hay una correlación positiva entre sodio y sulfato, influenciada probablemente por el pozo de Punta Cortés. Hay una relación positiva entre turbidez y nitratos, la turbidez puede deberse a la fracción arcillosa que entra en los pozos que son construidos precariamente, lo que haría pensar en una contaminación puntual, esta contaminación fuente de nitrato puede ser debida a que el nivel de agua subterránea es somero o a la aplicación de fertilizantes en cultivos en la zona, que pueden infiltrarse al agua subterránea. Hay una buena correlación entre la conductividad y la alcalinidad, lo cual es esperado ya que los carbonatos aportan el mayor peso de los iones presentes.

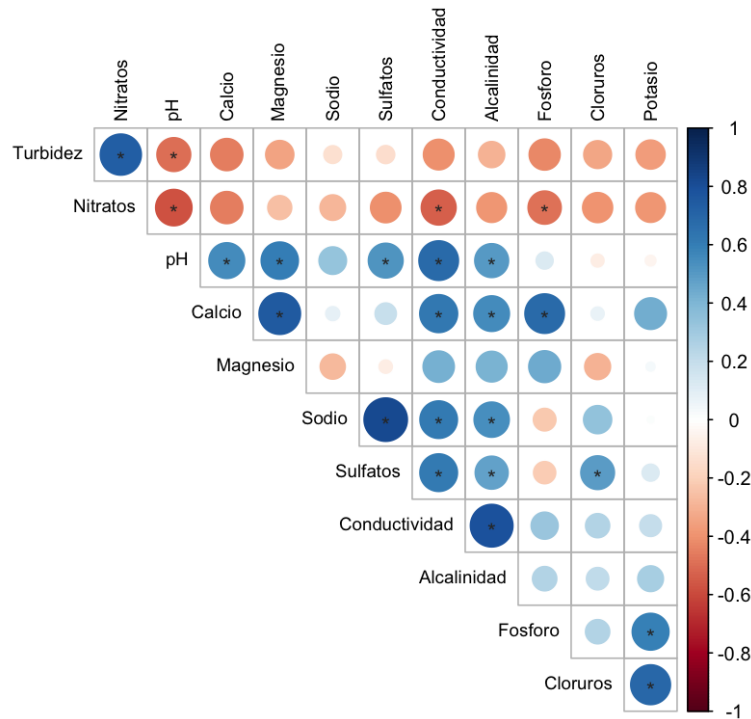


Fig. 3. Gráfico de correlaciones entre las variables físico-químicas analizadas en las muestras tomadas de pozos y red en la zona transfronteriza Costa Rica-Nicaragua. * pvalor < 0,05

DISCUSIÓN

Este es el primer estudio de potabilidad completo que se hace en pozos de la zona fronteriza Costa Rica-Nicaragua, específicamente en Los Chiles, Alajuela, Costa Rica. En esta área se ha dado un cambio de uso de suelo de forestal a cultivos intensivos como la plantación de piña y naranja, los cuales representan en la actualidad las principales actividades económicas de la zona.

En la zona, la disposición entre los asentamientos humanos y las zonas de cultivo no se encuentran estrictamente definidos lo que conlleva a una nula regulación de necesidades básicas como el acceso al recurso hídrico (Fig. 1). Lo cual implica que pueda existir competencia por el agua entre las plantaciones y las poblaciones humanas, y un efecto colateral a la salud de la población, por la exposición a sustancias químicas utilizadas en las actividades agrícolas, donde ya ha sido demostrada esta exposición en escenarios similares (Robson & Toscano, 2007; Cook & Speldewinde, 2015).

En general, para todos los pozos muestreados la concentración de bicarbonato es baja y el pH de neutro a ácido, lo que sugiere poco tiempo de tránsito del agua en el acuífero (Custodio & Llamas, 2001; Datta et al., 2022), sin embargo para los pozos de Combate y la Trocha, que se ubican al este de la zona de estudio, los niveles de calcio y magnesio son mayores, lo que sugiere mayor tiempo de contacto con la roca del acuífero (Custodio & Llamas, 2001; Adimalla & Venkatayogi, 2018; Mukonazwothe et al., 2022). Adicionalmente en las muestras analizadas en los pozos de Combate y La Trocha, los valores de concentración de los iones mayores varían poco entre época seca y época lluviosa, como se observa en el Tabla 2 en Apéndice.

Por otro lado, el Pozo Punta Cortés 1, presenta valores de sodio y sulfato muy superiores al resto de las muestras; sin embargo, con los análisis realizados hasta ahora no es posible conocer la fuente de estos iones.

No hay una tendencia clara en cuanto a la influencia de la época en la calidad del agua, salvo

para el pozo de Punta Cortés 2, donde se observa que en época seca hay poca recarga de agua en el acuífero por precipitación y aumenta la concentración de los iones en la disolución. Para este pozo se observa que las características del agua son similares a las de precipitación, con concentraciones más bajas de los iones mayoritarios como calcio, magnesio, bicarbonato, lo que se relaciona con los bajos valores de conductividad y pH más ácidos, esto se asocia a una recarga rápida y directa o que el pozo se ubica en un estrato más superficial (Adimalla & Venkatayogi, 2018).

Como se observa en el Tabla 2 en Apéndice, los valores reportados para nitrato son menores a 5mg/L, lo que significa que, en general, son bajos, este parámetro se asocia con contaminación antropogénica (Amano et al., 2016), ya sea aguas residuales, ganado o uso de fertilizantes. Además no existe una correlación significativa, entre este parámetro y el ion cloruro por lo tanto no se puede asociar a una fuente contaminación puntual como aguas residuales (Amano et al., 2016). Las concentraciones de cloruro para las aguas subterráneas normalmente se encuentran entre 0 y 10mg/L y pueden ser mayores por escorrentía de terrenos agrícolas, riego y descarga de aguas domésticas (Chapman, 1992). Es importante destacar que el Pozo Punta Cortés 2, presentó los mayores valores de nitrato de los sitios de muestreo, por lo que se recomienda observar su evolución para identificar posibles fuentes de contaminación.

En la mayoría de las muestras se observa un predominio del catión calcio, pero con presencia importante de magnesio, una disminución de sodio y potasio, lo que indica cierta evolución del agua en el acuífero (Prakash et al., 2020), la evolución normal de un agua de circulación regional es el predominio del calcio, luego el magnesio y por último el sodio (Custodio & Llamas, 2001).

Los pozos ubicados en zonas pobladas, no presentan evidencia contundente de contaminación por aguas residuales y su calidad físico-química es aceptable. Se analizaron plaguicidas organoclorados, organofosforados y carbamatos, todas las muestras presentaron niveles inferiores al límite de detección de los métodos empleados, se debe estudiar mejor el acuífero de la zona para poder conocer el riesgo de posible contaminación por el uso de este tipo de agroquímicos y así generar modelos de predicción como el utilizado por Morales (2013), que permite conocer el nivel de riesgo y tomar las medidas apropiadas para disminuir posibilidades de contaminación, si se trabaja en conjunto con el uso del suelo, algunos parámetros físico-químicos y el tipo de acuífero.

En cuanto a la calidad microbiológica, sólo uno de los pozos muestreados presentó coliformes fecales en cantidad mayor a la permitida por el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto N°38924-S, 2015), que corresponde al pozo La Trocha. Estos resultados fueron comunicados a la comunidad y se trabaja para mejorar el sistema de cloración. Estos hallazgos muestran que, a pesar de las condiciones adversas en la zona, los pozos mantienen un nivel mínimo de contaminación microbiológica. En general, la calidad del agua subterránea de la zona es aceptable, tanto en términos físicoquímicos como microbiológicos.

En resumen, el entorno geoquímico del pozo Punta Cortés 1 y el pozo Punta Cortés 2 es distinto a los demás. El pozo Punta Cortés 2 parece ser más susceptible a contaminación, por la presencia de nitratos (Amano et al., 2016) y los valores bajos para las concentraciones de los demás iones, lo que en general pueden indicar poca evolución del agua subterránea debido a una recarga directa y rápida. Este pozo, además, es el que se encuentra situado al oeste, más cerca del humedal. Se deben realizar estudios complementarios para comprender la geoquímica del Pozo Punta Cortés 1, ya que con la información disponible no pueden explicarse los altos contenidos de sodio presentes en estas muestras.

Es necesario realizar un seguimiento a los pozos de la zona para evaluar tendencias en el tiempo, por ejemplo la presencia de amonio, puede significar una evolución geoquímica del agua en el acuífero al pasar el nitrógeno de nitrato a amonio, ya que el ambiente geoquímico pasa a ser

reducido, o puede ser que se estén infiltrando compuestos fertilizantes que utilizan urea o nitrato de amonio en su composición y que son de uso común (Reynolds Vargas et al., 2006; Madrigal Solís et al., 2014), con los datos disponibles hasta este momento, no es posible discernir cuál de estos dos escenarios está ocurriendo.

Por último a pesar de no encontrar contaminación microbiológica y química en las fuentes de agua subterránea, se observan en la zona usos de suelo inadecuados cerca de los pozos, aumentando la probabilidad de contaminación de los cuerpos de agua y riesgo por exposición a contaminantes agrícolas en las poblaciones, principalmente en los casos de Combate e Isla Chica, por lo que se recomienda un programa de vigilancia continua de la calidad del agua en la zona de estudio, que permita generar alertas tempranas para evitar el deterioro del recurso hídrico.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de los fondos FEES-CONARE que hicieron posible esta investigación. Agradecemos a Rafael Esteban Jiménez Corrales, Isabel Badilla Zamora, Gabriela Solís Sánchez, Sylvia Segura Esquivel, Patricia Villalobos Vega, Carlos Solís Chacón, Irene Espinoza, Marian Guillén, a la empresa Hidroambiente Consultores S.R.L. y a la ONG Agua Viva Serves S.A. en Los Chiles, Costa Rica y a las comunidades por su colaboración.

ÉTICA, CONFLICTO DE INTERESES Y DECLARACIÓN DE FINANCIAMIENTO

Declaramos haber cumplido con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la preparación de este documento; 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, estamos de acuerdo con la versión editada final de esta publicación. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

La declaración de contribución de cada autor es la siguiente: L.Ch.J., P.F.S., E.M.M.: Diseño del estudio, L.Ch.J. P.F.S., E.M.M., R.V.M., K.B.J., recolección y análisis de datos. L.Ch.J. P.F.S., E.M.M., preparación del manuscrito y todos los coautores revisión y aprobación final del manuscrito.

REFERENCIAS

- Adimalla, N., & Venkatayogi, S. (2018). Geochemical characterization and evaluation of groundwater suitability for domestic and agricultural utility in semi-arid region of Basara, Telangana State, South India. *Applied Water Science*, 8(1), 44. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0682-1>
- Amano, H., Nakagawa, K., & Berndtsson, R. (2016). Groundwater geochemistry of a nitrate-contaminated agricultural site. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1145. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5968-8>
- Barrantes, O., & Sandoval, L. (2016). Uso/Cobertura de la tierra en los cantones de Upala, Guatuso y Los Chiles en el año 2011. *Revista Geográfica de América Central*, 56, 59-91. <https://doi.org/10.15359/rgac.1-56.3>
- Bogren, K., & Pruefer, A. (2008). QuikChem Method 10-107-04-1-F. In Determination of nitrate/nitrite by Flow Injection Analysis. Nitrate/Nitrite in surface water and wastewater. *Lachat Instruments*. <https://tinyurl.com/ytglhxx>
- Bridgewater L. (Ed.). (2017). *Standard Methods for the Examination of Wastewater*. (23ª ed.). American Public Health Association (APHA).
- Chapman, D. (1992). *Water Quality Assessment*. Chapman y Hall.



- Cook, A., & Speldewinde, P. (2015). Public Health Perspectives on Water Systems and Ecology. In C, Finlayson; P, Horwitz, y P, Weinstein (Eds), *Wetlands and Human Health* (pp 15-30). Springer. <https://tinyurl.com/ysyf5r87>
- Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega S.A.
- Datta, S., Karmakar, S., Islam, M. N., Karim, M., Kabir, M. H., & Uddin, J. (2022). Assessing landcover and water uses effects on water quality in a rapidly developing semi-urban coastal area of Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130388. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130388>
- Decreto Ejecutivo N°38924-S (2015). Reglamento para la calidad del agua potable. *Diario Oficial La Gaceta*, 170. Del 01 de setiembre del 2015. <https://acortar.link/Nw8VBF>
- Dirección de Agua. (2021). *Manual Técnico de Dotaciones de Agua*. <https://acortar.link/8Mu4wy>
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2010). Spatial Analyst Tutorial. *Environmental Systems Research Institute*. <https://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/pdf/spatial-analyst-tutorial.pdf>
- Food and Drug Administration. (1994). *Pesticide Analytical Manual*. <https://www.fda.gov/media/74881/download>
- Lessmann, C., & Steinkraus, A. (2019). The geography of natural resources, ethnic inequality and civil conflicts. *European Journal of Political Economy*, 59, 33–51. <https://doi.org/10.1016/j.ejpoleco.2019.01.005>
- Madrigal-Solís, H., Fonseca-Sánchez, A., Núñez-Solís, C., & Gómez-Cruz, A. (2014). Amenaza de contaminación del agua subterránea en el sector norte del acuífero Barva, Heredia, Costa Rica. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 5(6), 103-118.
- Madrigal-Solís, H., Fonseca-Sánchez, A., & Reynolds-Vargas, J. (2017). Caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos volcánicos Barva y Colima en el Valle Central de Costa Rica. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(1), 115–132.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica de Costa Rica (MIDEPLAN). (2018). *Índice de desarrollo social 2017*. <https://www.mideplan.go.cr/indice-desarrollo-social>
- Morales, A., Acuña, G., & Wing-Ching, K. (2010). *Migración y salud en zonas fronterizas: Nicaragua y Costa Rica*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/7236/S1000586_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Morales, R. (2013). Metodología de análisis del riesgo por contaminación de agroquímicos: cuenca del Río San Blas, Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 22(1), 35–44. <https://acortar.link/w6hf6L>
- Mukonazwothe, M., Munyai, L. F., & Mutoti, M. I. (2022). Groundwater quality evaluation for domestic and irrigation purposes for the Nwanedi Agricultural Community, Limpopo Province, South Africa. *Heliyon*, 8(4), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09203>
- Nelson, D. (2008). QuikChem Method 10-206-00-1-A. In Determination of urea in waters by Flow Injection Analysis Colorimetry. *Lachat Instruments*, 12. https://www.uvm.edu/bwrl/lab_docs/protocols/Nitrate_water_lachat.pdf
- Organización de Naciones Unidas (ONU). (2015). *Resolución A/RES/70/1 Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Prakash, R., Prakash, D., & Kumar, S. (2020). Survey and Characterization of Groundwater Quality for Irrigation in Faridabad District of Haryana, India. *Journal Of Soil Salinity And Water Quality*, 12(1), 22–27.
- Programa Estado de la Nación (PEN). (2016). *Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. <https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/70>
- Programa Estado de la Nación (PEN). (2019). *Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. Programa Estado de la Nación, San José, Costa Rica.
- Reynolds-Vargas, J., Fraile-Merino, J. & Hirata, R. (2006). Trends in Nitrate Concentrations and Determination of its Origin



Using Stable Isotopes (^{18}O and ^{15}N) in Groundwater of the Western Central Valley, Costa Rica. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 35(5), 229-236. <https://doi.org/10.1579/05-R-046R1.1>

Robson, M., & Toscano, W. (2007). *Risk assessment for environmental health*. Jossey-Bass, John Wiley y Sons, Inc.

Salas-Acuña, E. (2018). Repensando la educación rural en una zona transfronteriza entre Costa Rica y Nicaragua: El caso de la Región Huetar Norte (RHN). *Revista Electronica Educare*, 22(2), 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.15359/ree.22-2.18>

Sánchez, L. (2018). *Patrones territoriales y factores sociodemográficos asociados a los homicidios y el narcotráfico en Costa Rica*. Programa Estado de la Nación. <https://acortar.link/WR3xWD>

Solano, M., Morales, E., Chacón, L., Cordero, E., Reyes, L., Barrantes, K., & Achi, R. (2019). Low cost internal controls for detection of *Giardia* cysts in water samples. *Parasitology International*, 71, 177–179. <https://doi.org/DOI:10.1016/j.parint.2019.04.012>

Tucker, S. (2007). QuikChem Method 10-107-06-2-O. In Determination of ammonia by Flow Injection Analysis. Ammonia in surface water and wastewater. Lachat Instruments. <https://tinyurl.com/yqbd7q62>

Varady, R., Albrecht, T., Gerlak, A., Wilder, M., Mayer, B., Zúñiga, A., Ernst, K., & Lemos, M. (2020). The exigencies of transboundary water security: insights on community resilience. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 44, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.06.005>

Wei, T., & Simko, V. (2017). *R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84)*. GitHub. <https://github.com/taiyun/corrplot>

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag.

World Health Organization. (2017). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

APÉNDICE

