



Mapificación de arsénico en acuíferos volcánicos del noroeste de Nicaragua para contribuir a la gestión del agua de consumo potable en 70 comunidades

Mapping of arsenic in volcanic aquifers in northwest Nicaragua to contribute to the management of drinking water in 70 communities

Valeria Delgado Quezada

Máster en Hidrogeología

CIRA/UNAN-Managua

<https://orcid.org/0000-0002-0061-7129>

valeria.delgado@cira.unan.edu.ni

Bianka Rosa Reyes Altamirano

Máster en Ingeniería del Agua

CIRA/UNAN-Managua

<https://orcid.org/0000-0001-5916-3355>

bianka.reyes@cira.unan.edu.ni

Yelba del Carmen Flores Meza

Máster en Ciencias del Agua

CIRA/UNAN-Managua

<https://orcid.org/0000-0003-1182-0541>

yelba.flores@cira.unan.edu.ni

Recibido el 19 de marzo 2024 / Aceptado el 11 de junio 2025

<https://doi.org/10.5377/rtu.v14i40.21145>

Palabras clave: acuíferos volcánicos, arsénico en agua, mapificación arsénico, seguridad hídrica.

Keywords: volcanic aquifers, arsenic in water, mapping of arsenic, water security.

RESUMEN

Para la mapificación del As se realizaron cinco campañas de monitoreo (octubre 2022-febrero 2023), midiendo los niveles de agua, parámetros de campo y muestreo para isótopos estables (44 sitios) y arsénico (62 sitios). Así mismo, en los meses de octubre 2022 y febrero 2023, se colectaron las muestras para físico-químicos (10 sitios). En adición se realizó un levantamiento y muestreo de material geológico en enero 2023. Las vías y fuentes de distribución de arsénico en el agua subterránea son de origen geogénico (formaciones de origen terciario y cuaternario). La dinámica de flujo muestra que hay dos recargas: la regional y una directa; la cual se corrobora a través de los resultados isotópicos e hidroquímicos. Los niveles piezométricos oscilaron entre 80 y 60 m s.n.m. Las concentraciones de arsénico detectadas entre menores al límite de detección del método y 48 µg/L. Ocho de los 62 sitios monitoreados, registraron valores mayores al permitido para consumo humano por la OMS. Doce fuentes de agua deben de estar en constante monitoreo, debido a la variación de concentraciones presentadas durante el estudio. La mapificación refleja tres zonas que deben ser de especial atención para la adecuada gestión del recurso y seguridad hídrica, debido a que el arsénico es un compuesto que se bioacumula a través de la ingesta de agua.

ABSTRACT

For arsenic mapping, five monitoring campaigns were carried out (October 2022-February 2023), measuring water levels, field parameters and sampling for stable isotopes (44 sites) and arsenic (62 sites). Likewise, in the months of October 2022 and February 2023, samples for physical-chemical tests were collected (10 sites). In addition, a survey and sampling of geological material was carried out in January 2023. The routes and sources of arsenic distribution in groundwater are of geogenic origin (formations of Tertiary and Quaternary origin). The flow dynamics show that there are two recharges: regional and local; which is corroborated through the isotopic and hydrochemical results. The piezometric levels ranged between 80 and 60 m a.s.l. The concentrations

of arsenic detected were lower than the detection limit of the method and 48 µg/L. Eight of the 62 monitored sites recorded values higher than those allowed for human consumption by the WHO. Twelve water sources must be constantly monitored, due to the variation in concentrations presented during the study. The mapping reflects three areas that must be given special attention for adequate resource management and water security, because arsenic is a compound that bioaccumulates through water intake.

INTRODUCCIÓN

El suministro de agua segura para las poblaciones rurales en áreas afectadas con arsénico, es de interés clave para las autoridades nacionales para realizar la gestión de los recursos hídricos subterráneos, enmarcado en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (1, 2, 3 y 6) propuestos en la Agenda 2030, los ejes de El Plan Nacional de Lucha Contra la Pobreza y para el Desarrollo Humano 2022-2026 (GRUN, 2021).

El arsénico (As) ha sido detectado en aguas subterráneas en varios países del mundo cuya vía de distribución es de origen geogénico [(Bundschuh, y otros, 2012), (Herrera-Murillo, y otros, 2017)]. Este metaloide es altamente tóxico (Gómez C., 2011) y bioacumulable a través de la ingesta, representando un riesgo a la salud humana (Medina-Pizzali M., Robles P., Mendoza M., & Torres C., 2018). En Nicaragua, se reportó el primer caso de hidroarsenicismo en Centroamérica en la comunidad de El Zapote (1320 µg/L) [(Aguilar, Parra, Cantillo, & Gómez, 2000), (Altamirano Espinoza & Bundschuh, 2009)]; y se ha detectado en rangos de concentración de 10–1320 µg/L ($n=173$, $\bar{x}=48.30$ µg/L) (Delgado Quezada, Altamirano Espinoza, & Bundschuh, 2020).

Al ser la tercera parte de Nicaragua un territorio volcánico (INETER, 2004), el suministro de agua en muchas comunidades rurales es crítico por la presencia de arsénico en concentraciones superiores al máximo permitido para consumo humano; especialmente cuando es la única fuente de agua para la comunidad. El objetivo de este trabajo es conocer las áreas de distribución espacial (mapificación)

del arsénico para determinar áreas seguras para abastecimiento de la población. Esta investigación puede ser replicable para otras áreas con problemáticas similares.

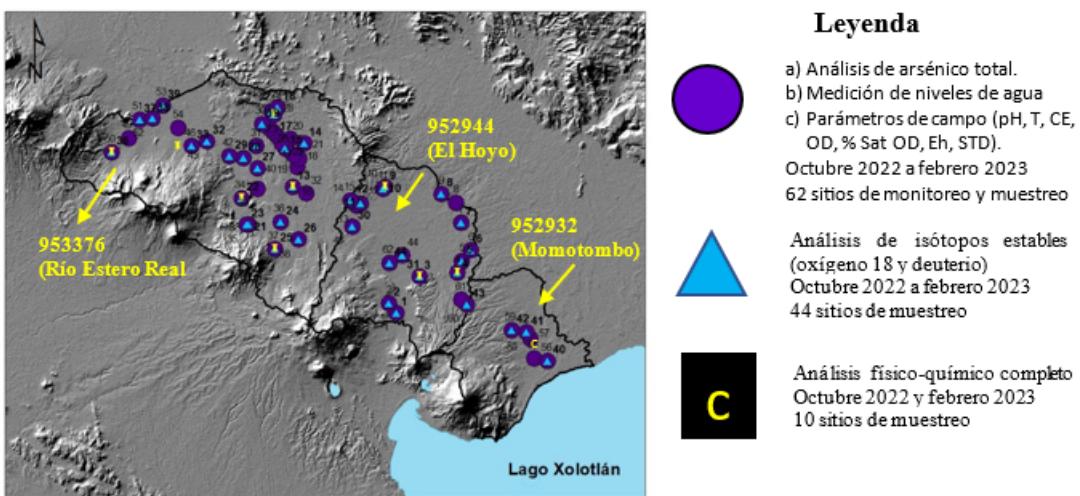
METODOLOGÍA

Área de estudio: se ubica en las unidades hidráulicas 952932, 95944 y 953376 (INETERA. U., 2014) (Figura 1), dentro de la provincia de la Depresión de Nicaragua, una estructura geológica regional activa, lo que se refleja en la Cadena Volcánica de los Maribios en donde los complejos volcánicos San Cristóbal-Casita-La Pelona, Telica-San Jacinto-Santa Clara, Cerro Negro-Rota, Las Pilas-El Hoyo y Momotombo forman el límite Noroeste – Suroeste (NO-SO). Los depósitos de estos complejos y las deposiciones de otro origen han formado los terrenos circundantes. Así, se pueden distinguir lavas y piroclastos, formaciones indiferenciadas y residuales, y depósitos aluviales. Estos terrenos han dado paso a la formación de acuíferos de variable productividad, destacando el acuífero de Malpaisillo al Sureste (SE) y parte del acuífero de Villanueva. El resto del área presenta medio hidrogeológico mixto, poroso y fracturado con las consecuentes diferencias en la disponibilidad y calidad del agua [(INETER & C., 2012; INETER & M., 2014)].

Diseño de monitoreo: se realizaron cinco giras mensuales de octubre 2022 a febrero 2023, para el monitoreo hidrogeológico e hidrogeoquímico en 62 sitios de estudio, que son los principales medios de abastecimiento de agua de consumo en 70 comunidades del área de estudio. Se colectaron muestras de agua para análisis fisicoquímico (octubre 2022 y febrero 2023); medición de niveles de agua y parámetros *in situ*, arsénico, isótopos (de octubre a febrero) (Figura 1). Así mismo, se colectaron muestras de roca (15), suelos (13) y sedimentos (2) en enero 2023, para la determinación de metales pesados (As, V, Cr, Mo, Se, Sb). La toma de muestras (captación y preservación) se realizó acorde a los procedimientos operativos correspondientes a cada laboratorio, basados en (NTON ISO/IEC , 2017) y (APHA, 2012).

Figura 1.

Sitios de muestreo y colecta de muestras en el área de estudio.



Procedimientos analíticos: en la Tabla 1 se reporta la metodología analítica utilizada para el análisis de las muestras de agua y el material geológico (rocas, suelos y sedimentos) colectados. Los resultados fisicoquímicos y arsénico en agua se compararon con la Norma de Calidad del Agua para Consumo Humano (CAPRE,1994).

Tabla 1.

Métodos para análisis de laboratorio.

| Matriz | Parámetro | Método | Equipo |
|--------------------|---|----------------------|--|
| Agua | Arsénico (As) | PT971 | Palintest Pt 981 |
| | Isótopos ^{18}O y ^2H | Espectrometría Laser | LWIA 912-0008* |
| | Físico-químico | APHA, 2012 | Cromatógrafo iónico, espectrofotómetro UV visible, ISE |
| Material Geológico | As, Sb, Cr, Mo, Se y V | EPA 3050b | ICP-OES** |

* LWIA: Liquid Water Isotope Analyzer.

**: espectroscopía de emisión óptica con Plasma de acoplamiento inductivo.

Tratamiento estadístico de los resultados: cada muestra de arsénico fue procesada por triplicado; un blanco y un control, analizados en cada lote de 10 muestras examinadas. Los datos recopilados se procesaron y analizaron utilizando los softwares ArcGIS 13.0, Surfer 12, Easy_Quim 5.0 y paquete de Microsoft Excel.

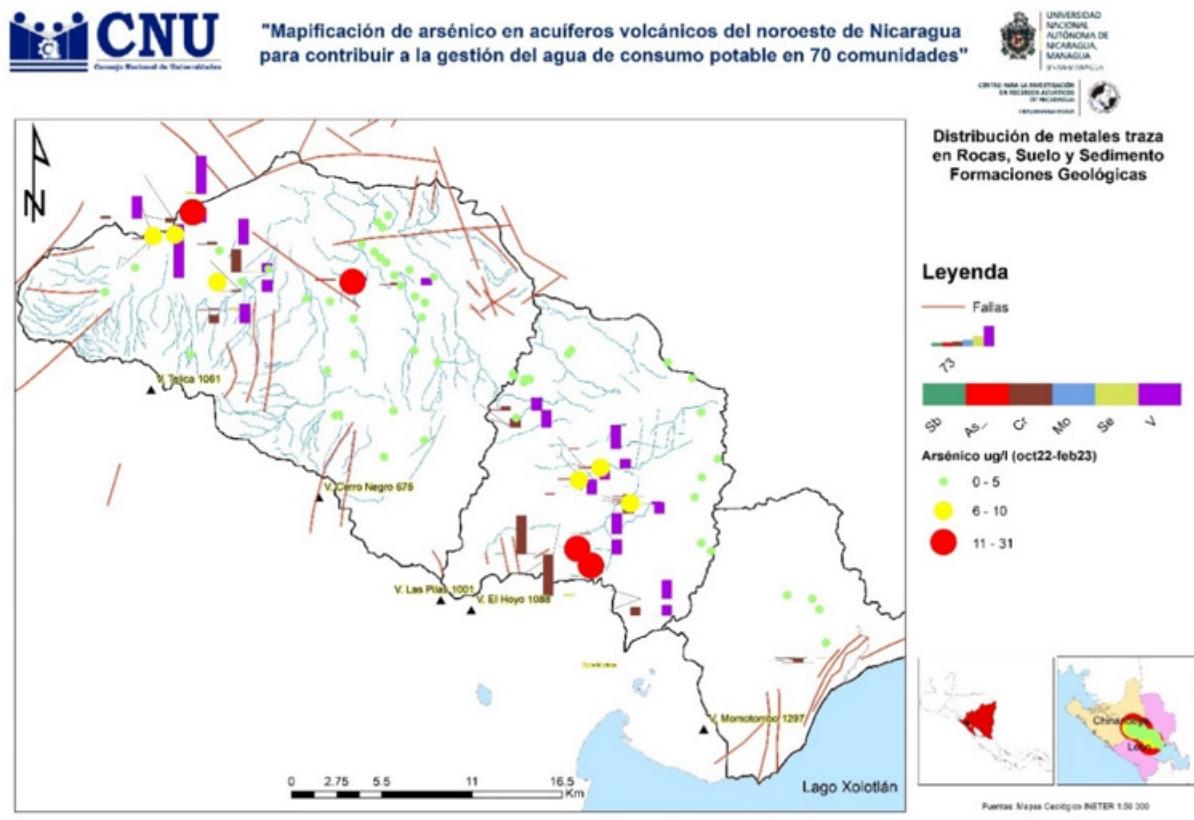
RESULTADOS

1.1. Geología

Los trabajos de campo muestran la predominancia de lavas y piroclastos de composición basalto-andesítica, con metales trazas en diferentes concentraciones (Figura 2). De los metales traza el de mayor concentración es el vanadio (10.15 a 133.15 mg/Kg), seguido por el cromo (0.53 a 145.71 mg/Kg), arsénico (0.1 a 6.204 mg/Kg), molibdeno (0.03 a 2.08 mg/Kg), selenio (0.21 a 7.97 mg/Kg) y antimonio (de no detectado a 2.18 mg/Kg).

Figura 2

Composición química del material geológico monitoreado (As, V, Cr, Mo, Se, Sb).



1.2. Dinámica de las Aguas Subterráneas

De la interpretación de las isopiezas de los niveles piezométricos promedios de la zona de estudio (Figura 3), se observan tres subsistemas principales: a) San Cristóbal-Cerro Negro-Telica, que recarga al S y SO y descarga al N del área de estudio. Los niveles piezométricos oscilan entre 70-30 m s.n.m., presentando permeabilidades de media a baja, con gradientes hidráulicos de 0.005; b) Cerro Negro-Las Pilas, con recarga al Sur y descarga al N y NE; con permeabilidades más altas y gradiente hidráulico de 0.0006, casi horizontal; c) Cerro Montoso-Momotombo, que recarga en el cerro con descarga al Lago Xolotlán, y presenta permeabilidades menores que las de la zona central y gradiente hidráulico de 0.003.

Para definir el origen de la recarga de las aguas subterráneas se realizaron análisis de isótopos estables (^{18}O y ^2H) en agua subterránea y precipitación (Tabla 2). Los resultados de la composición isotópica para ambas fuentes de agua se reportan en la Figura 4.

Figura 3

Dinámica de las Aguas Subterráneas de la zona de estudio.

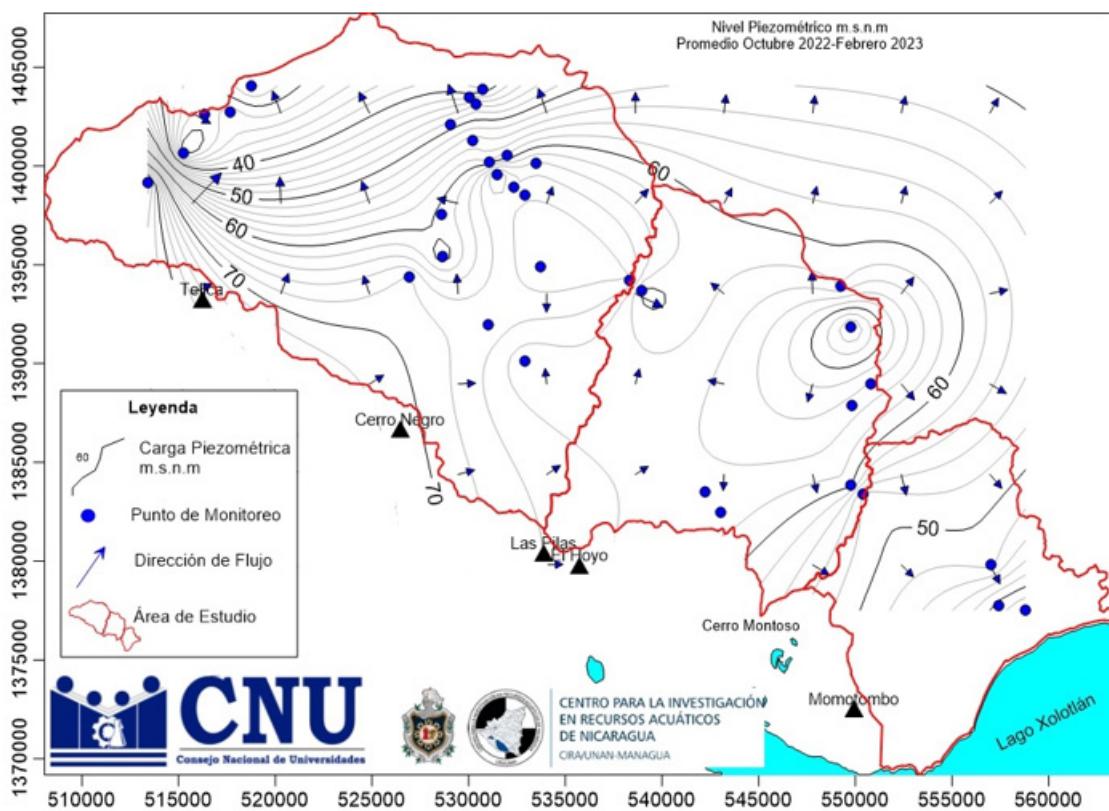
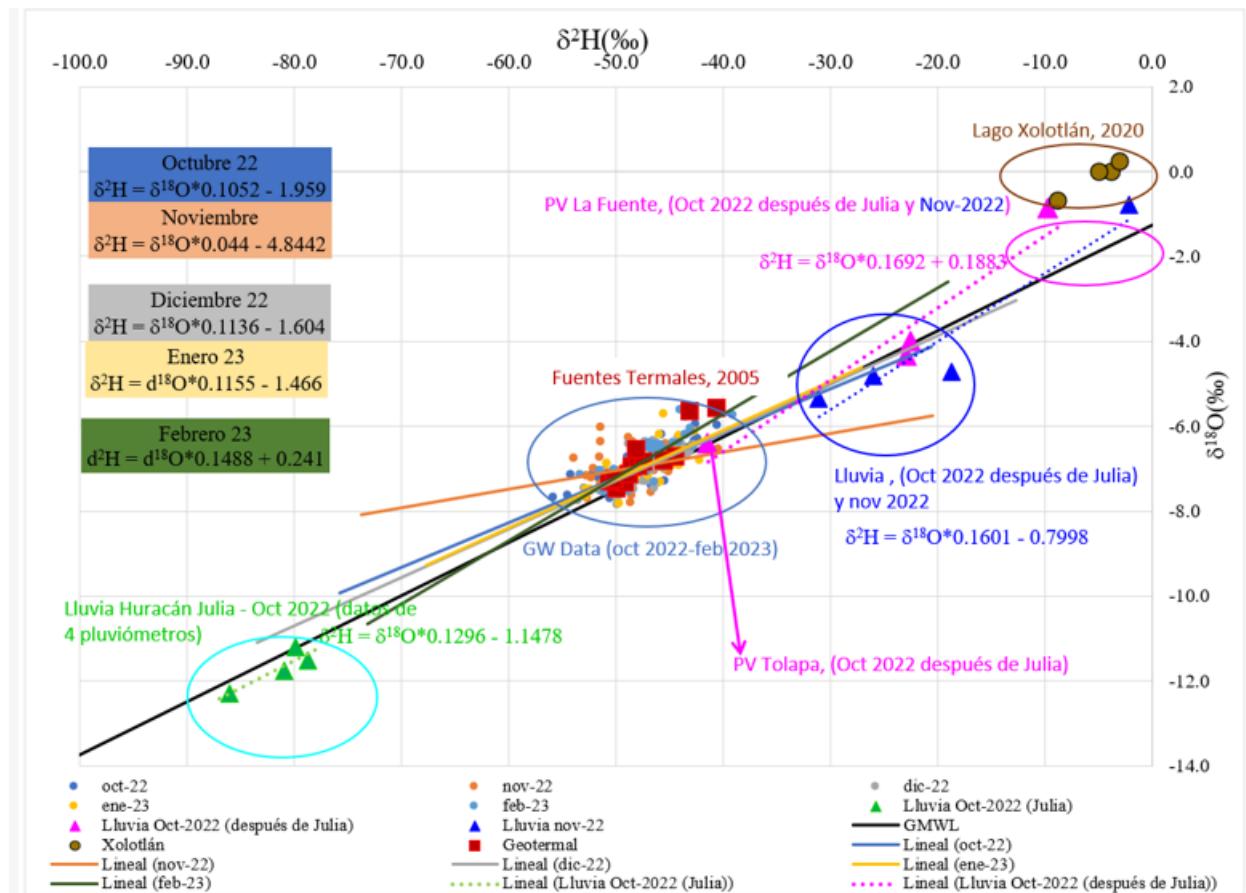


Figura 4*Composición Isotópica de las muestras de agua subterránea y precipitación***Tabla 2.***Rango de valores isotópicos (^{18}O y ^2H) para muestras de agua.*

| Fuentes | Valores en Agua Subterránea | | Valores en precipitación | |
|----------|-----------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^2\text{H}$ | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^2\text{H}$ |
| Promedio | -47.69 | -6.94 | -41.67 | -6.50 |
| Máximo | -47.11 | -6.77 | -2.14 | -0.77 |
| Mínimo | -48.40 | -7.05 | -85.98 | -12.29 |

1.3. Calidad del Agua

La hidroquímica del agua determinó que el potasio (6 de 10 sitios) y la conductividad eléctrica (8 de 10 sitios), no cumplen con los valores recomendados (CAPRE, 1994). Se evidencia un predominio de las aguas bicarbonatadas sódicas y sus variantes; seguidas de otras composiciones como bicarbonatadas cárnicas y magnésicas. La temperatura del agua se reporta en rangos de 20 y 35°C (55 de 62 sitios) y entre 35 a 45°C, en los siete puntos restantes. Temperaturas superiores a los 30°C en las aguas de consumo humano, no son recomendables (CAPRE, 1994).

En la zona de estudio, 50 de los pozos presentaron pH entre 6.5 y 8.5 (CAPRE, 1994); mientras que 12 sitios mostraron valores menores al mínimo recomendado, en al menos uno de los meses de monitoreo. Por otro lado, el potencial de oxidación-reducción (Eh), los valores fueron positivos (73 a 505 mV). Por último, el oxígeno disuelto osciló entre 2.16 y 8.74 mg/L.

1.4. Concentración de Arsénico en Agua de consumo

Los resultados de arsénico se clasificaron en cuatro grupos, conforme las concentraciones detectadas: a) iguales o superiores a 10 µg/L (13%), b) entre 5 y 10 µg/L (6%), c) entre 0.8 y 5.0 µg/L (58%) y d) 23% por debajo del límite de detección del método, determinado en 0.3 µg/L (Tabla 3).

Tabla 3.

Distribución de las fuentes de agua monitoreadas conforme el rango de concentraciones de arsénico detectado.

| Concentraciones de arsénico en agua subterránea (µg/L) | | | | |
|--|----------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| >10 | Entre 5 y 10 | Entre 0.3 y <5 | AND | |
| Porfirio Alta-mirano | Los Patos | Finca Anika | Los Delgado Comunal | Agua Fría |
| Finca Santa Rosa | Los Terreros 4 | Buenavista | Los Mangles | CAPS San Ildefonso Norte |
| La Fuente Comunal | Mokorón | Comarca San Ignacio | Los Portillos | Charco de los Bueyes |

Concentraciones de arsénico en agua subterránea ($\mu\text{g/L}$)

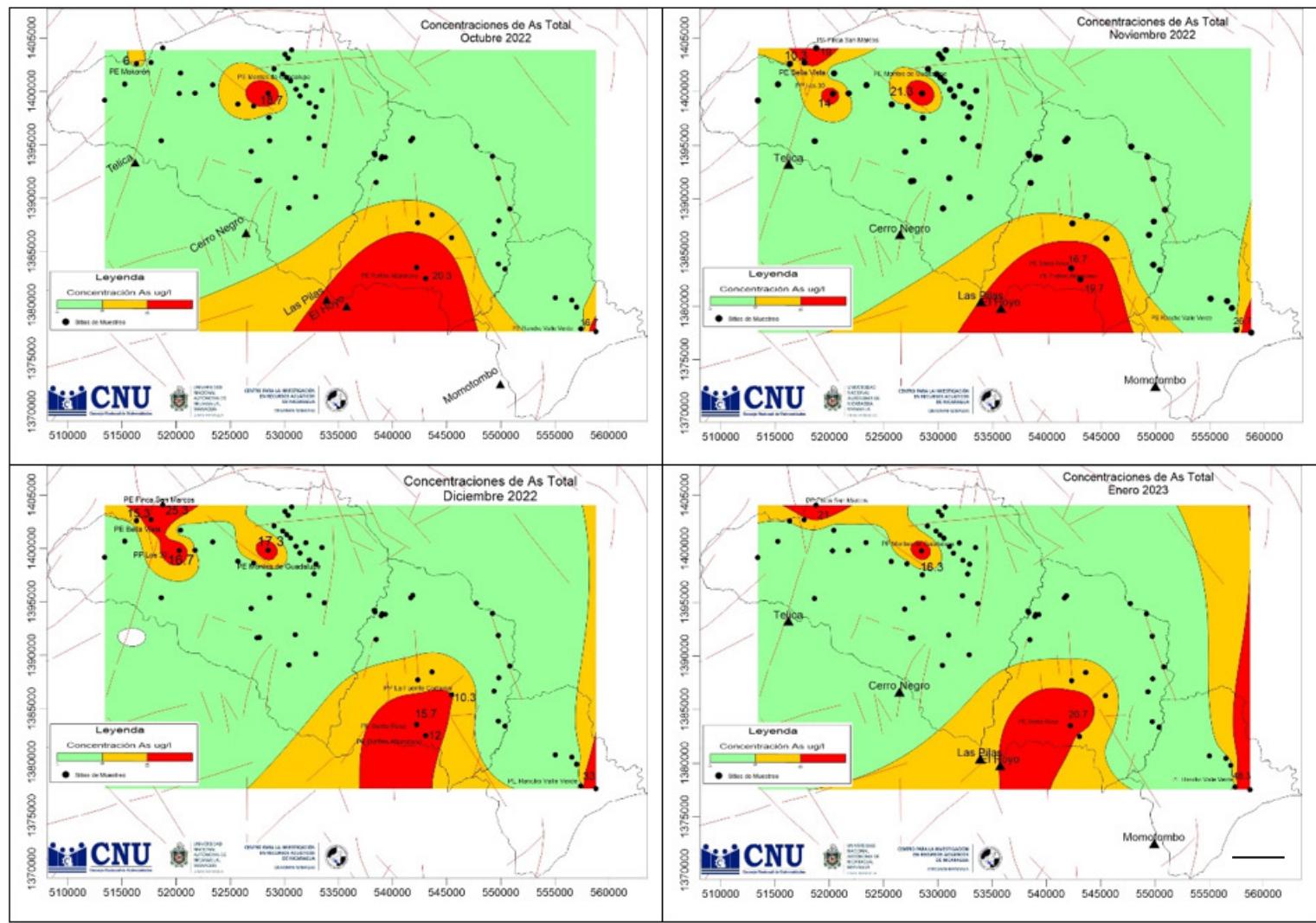
| >10 | <i>Entre 5 y 10</i> | <i>Entre 0.3 y <5</i> | <i>AND</i> |
|----------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| Montes de Guadalupe | El Jicanto | Correviento | Los Zapata |
| Las 30 | | El Cambio | Miraflores |
| Bellavista | | El Cortezal | Olocotón |
| Finca San Marcos | | El Cuadro | Papalonal nuevo |
| Rancho Valle Verde 2 | | El Guanacaste | Papalonal viejo comunal |
| | El Petén | | PP#3 Mimba/Galilao |
| | El Petén 2 | | PP#5 Galilao/Paraíso |
| | El Piñuelar | | Rancho Valle Verde 1 |
| | El Piñuelar 2 | | Ricardo Ruenda |
| | El Tigre | | San Ildefonso Sur |
| | El Yugo | | San Isidro |
| | Finca Miraflores | | San Jacinto |
| | La Esperanza | | San José de Apante |
| | La Sirena | | Tecuaname |
| | Las Trozas 3 | | Tolapa Comunal |

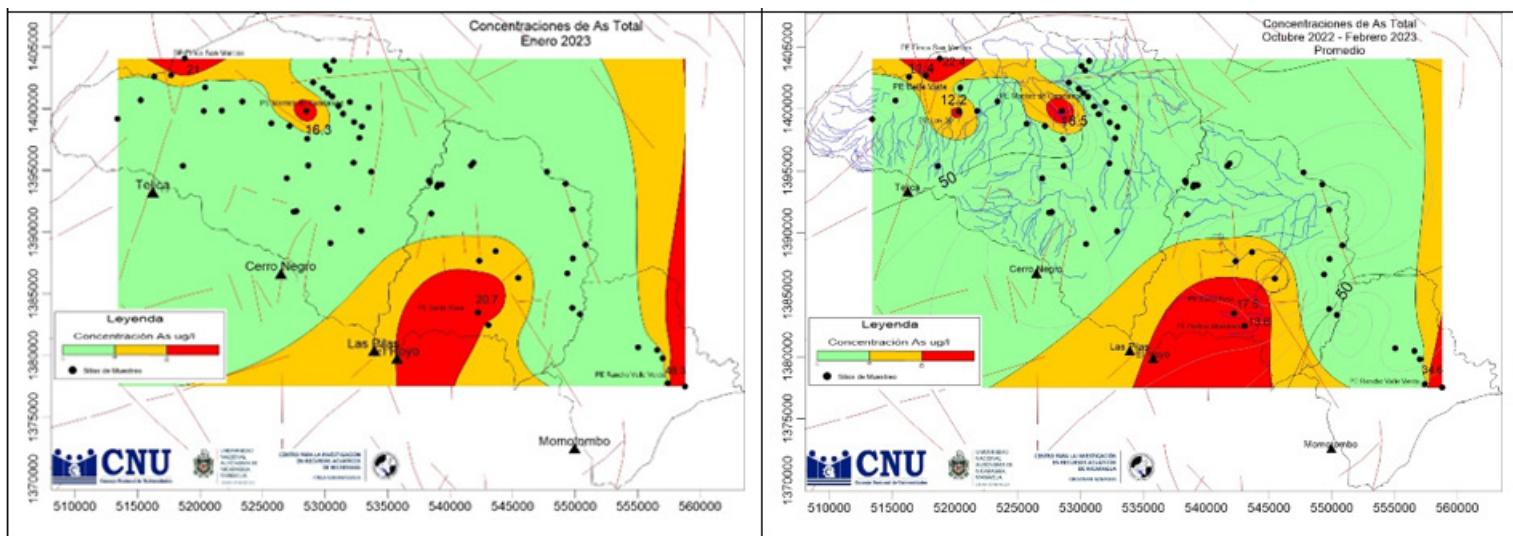
1.5. Mapificación de arsénico en las unidades hidrográficas 952932 (Momotombo), 952944 (El Hoyo) y parte de la cuenca 953376 (Río Estero Real)

Los resultados arrojan tres zonas con altas concentraciones de As, siendo estas: 1) en las faldas del Complejo Volcánico San Cristóbal – Casita y colindante con las rocas volcánicas terciarias, lo cual parece ser la mayor influencia de las concentraciones de As en la zona; 2) Área de la comunidad La Fuente, afectada por el complejo Volcánico Las Pilas – El Hoyo; y 3) Zona de Rancho Valle Verde, afectada por el Volcán Momotombo (Figura 5).

Figura 5

Mapificación de arsénico en el área de estudio, en los meses de: a) octubre 2022, b) noviembre 2022, c) diciembre 2022, d) enero 2023, e) febrero 2023 y f) promedio de octubre 2022 a febrero 2023.





DISCUSIÓN

Las zonas volcánicas presentan concentraciones variadas de arsénico dependiendo principalmente de la composición de las rocas y su interacción con los fluidos hidrotermales [(Mollinedo & Vargas, 2019), (Murray, Tapia, Ormachea, Tirado, & Nordstrom, 2023), (Altamirano, 2020), (Almeida, 2022)]. El arsénico en material geológico se reportó en bajas concentraciones en comparación con los otros metales monitoreados, de igual manera que a las reportadas en otras investigaciones en las rocas de complejos volcánicos en Nicaragua, han mostrado mayores concentraciones que las encontradas en este trabajo [(Robidoux et al., 2017), (Morales-Simfors & Bundschuh, 2022)].

La dinámica de flujo subterráneo va en dirección SE-NO, con niveles piezométricos que oscilan entre los 80 y 60 m s.n.m. Presenta una recarga regional en las partes altas de la cordillera volcánica y una local, confirmado a través de la piezometría (Figura 3), la hidroquímica y la isotopía (Figura 4, Tabla 2). Se observan tres sistemas acuíferos: uno de los sistemas acuíferos descarga hacia el Norte; el segundo en la parte central, descarga al Este; y el tercero, descarga al SE en dirección al Lago de Nicaragua (Figura 3).

Por otro lado, no siempre hay una relación directa entre el alto contenido en arsénico en el agua y un alto contenido en arsénico en los materiales que constituyen el acuífero. De hecho, no existe un modelo geológico/hidrogeológico. La presencia

de arsénico en cada caso es la consecuencia de un ambiente geoquímico y unas condiciones hidrogeológicas particulares (Lillo, 2008).

Las precipitaciones muestreadas tienen marcas isotópicas diferentes: la del Huracán Julia [del 7 al 10 de octubre 2022; (<https://www.nhc.noaa.gov/>, 2024)] se muestra empobrecida indicando formación en las masas continentales, mientras que las lluvias normales a partir del 11 de octubre y noviembre 2022, se muestran enriquecidas teniendo su origen desde cuerpos de agua superficial. Sin embargo, es preciso mencionar que solamente uno de los eventos (muestra en Tolapa, para el mes de octubre) parece haber recargado el acuífero; el que en general muestra agua de mezcla con aporte de fuentes termales (Figura 4).

En lo que respecta a la caracterización hidroquímica, se evidencia un predominio de las aguas bicarbonatadas sódicas y sus variantes, indicando unas aguas de reciente infiltración; seguidas de otras composiciones como bicarbonatadas cárnicas y magnésicas, que evidencian mayor interacción del agua con la roca presente en el acuífero (Domenico, 1998).

De acuerdo con el rango de temperatura reportado, las aguas se clasifican en: un 88.7% como hipotermal (de 20 a 35°C), y un 11.3% como mesotermal (de 35 a 45°C). Los valores de temperatura se mantuvieron en la mayoría de los casos, lo que sugiere una relativa estabilidad térmica en la zona.

Los valores de pH y de potencial de oxidación-reducción (Eh) son importantes cuando se realiza monitoreo de compuestos polivalentes, como el caso de los metales pesados (Appelo & D.Postma, 1993). Recordando que el estado de oxidación del As y su movilidad se controlan fundamentalmente por las condiciones redox y el pH en sistemas acuosos (Rangel, Hernández, Luévanos, & Balagurusamy, 2015).

El arsénico existe en cuatro estados de oxidación: -3, 0, +3 y +5 [(Hughes MF., Beck BD., Chen Y., Lewis AS., & Thomas DJ., 2011), (Jomova K., y otros, 2011)]; siendo los compuestos arsenicales en estados de oxidación trivalente y pentavalente los de mayor interés en estudios ambientales (Hughes MF., Beck BD., Chen Y., Lewis AS., & Thomas DJ., 2011). En el agua potable, el arsénico se encuentra en forma inorgánica como arsenato (As+5) y como arsenito (As+3) (Chávez-Capilla T., Beshai M., Maher W., Kelly T., & Foster S., 2016). Las formas trivalentes son más tóxicas

que las pentavalentes [(Hughes MF., Beck BD., Chen Y., Lewis AS., & Thomas DJ., 2011), (Abernathy, C. & Morgan A., 2001), (Hong Y-S., Song K-H., & Chung J-Y., 2014), (Pizarro I., Gómez-Gómez M., León J., Román D., & Palacios MA., 2016)].

Las concentraciones de arsénico presentaron una gran variación durante el periodo de muestreo, identificándose 12 pozos que requieren de un monitoreo constante, para detectar cualquier variación que puede ser producida por la profundización de pozos debido al descenso de los niveles de agua en el periodo de sequía o por incremento en la extracción de agua; y de esta manera, tomar medidas preventivas oportunas que garanticen la calidad del agua para el consumo humano.

La zonificación del As (Figura 5) ha sido posible gracias a la integración de la investigación geológica, hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica, dando como resultado tres zonas en donde el arsénico presenta variabilidad en las concentraciones (>10 y $48 \mu\text{g/L}$); destacando que el resto del área presenta concentraciones de arsénico en el agua de los pozos no sobrepasan el valor máximo permisible para consumo humano (CAPRE, 1994).

A estas tres zonas se les debe prestar especial atención para la adecuada gestión del recurso y seguridad hídrica, debido a que el arsénico es un compuesto que se bioacumula a través de la ingesta de agua.

CONCLUSIONES

1. La principal fuente y vía de distribución de arsénico en las fuentes de agua monitoreadas, es de origen geogénico: material volcánico de origen terciario presente en la parte norte, y material volcánico cuaternario.
2. El flujo regional es principalmente N, NE, E y S y se demostró que hay dos recargas, la regional desde la cadena volcánica y la local; a través de la piezometría, la evolución química y la isotopía. Así mismo, la caracterización físico-química confirmó que 50 de las 62 fuentes estudiadas pueden considerarse aptas para consumo humano.
3. La mapificación estableció tres zonas con altas concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas, y en el resto del área el arsénico está presente en concentraciones aptas para el consumo humano. Las zonas 1 y 2 requieren mayor atención en la gestión y seguridad hídrica.

AGRADECIMIENTOS

El estudio fue posible al financiamiento del Consejo Nacional de Universidades (CNU), a través de los Fondos Concursables para Investigación 2022, ejecutado por el CIRA/UNAN-Managua. En el estudio colaboraron el MINSA, ANA y CIB/UNAN-Managua.

BIBLIOGRAFÍA

- Abernathy, C., & Morgan A. (2001). *Exposure and Health Effects. UN synthesis report on arsenic in drinking water.* Obtenido de WHO: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/arsenicun3.pdf
- Aguilar, E., Parra, M., Cantillo, L., & Gómez, A. (2000). Chronic Arsenic Toxicity in El Zapote - Nicaragua 1996. *Medicina Cutánea Ibero-Latino-Americana*, 168-173.
- Almeida, E. (2022). Caracterización geoquímica de las aguas termales y de sus concentraciones de arsénico en el sistema volcánico-hidrotermal del Puracé (Colombia). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Altamirano Espinoza, M., & Bundschuh, J. (2009). Natural arsenic groundwater contamination of the sedimentary aquifers of southwestern Sébaco valley, Nicaragua. *Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America*, 109-122.
- Altamirano, M. (2020). Contaminación natural por arsénico en las aguas subterráneas de la comunidad rural “La Fuente”, para sugerir y promover el uso de fuentes alternativas de agua segura municipio La Paz Centro, León, Nicaragua. *Torreón Universitario*, 8(23), 58-78. doi:10.5377/torreon.v8i23.9533
- Andrewes P., Demarini DM., Funasaka K., Wallace K., Lai VWM., & Sun H, et al. (2004). Do arsenosugars pose a risk to human health? The comparative toxicities of a trivalent and pentavalent arsenosugar. *Environ Sci Technol.*, 4140-8.
- APHA. (2012). *Standard Methods for the Examination of water and wastewater* (22nd ed.). Washington: American Public Health Association.

- Appelo, C., & D.Postma. (1993). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A.Balkema.
- Bundschuh, J., Litter, M., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H., Shu Jean, J., . . . Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of Total Environment*, 76-91.
- Cameán, Ana María, & Repetto M. . (2006). *Toxicología alimentaria*. España: Ediciones Díaz de Santos.
- CAPRE. (1994). *Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano*. Comité de Agua de la Región .
- Chávez-Capilla T., Beshai M., Maher W., Kelly T., & Foster S. (2016). Bioaccessibility and degradation of naturally occurring arsenic species from food in the human gastrointestinal tract. *Food Chem.* , 189-97.
- Delgado Quezada, V., Altamirano Espinoza, M., & Bundschuh, J. (2020). Arsenic in geoenvironments of Nicaragua: Exposure, health effects, mitigation and future needs. *Science of Total Environment*, 1-37.
- Domenico, P. a. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology* (2nd Edition ed.). New York.: John Wiley & Sons Inc.
- Gómez C., A. (2011). *Impacto de la ingesta de agua contaminada con arsénico en la salud de la población de comunidades rurales del territorio No. 2 del municipio de Telica, León. Managua*. Nuevas Esperanzas, León.
- GRUN. (19 de Julio de 2021). *pndh.gob.ni*. Obtenido de pndh.gob.ni: [https://www.pndh.gob.ni/documentos/pnlc-dh/PNCL-DH_2022-2026_V20221004\(19Jul21\).pdf](https://www.pndh.gob.ni/documentos/pnlc-dh/PNCL-DH_2022-2026_V20221004(19Jul21).pdf)
- Herrera-Murillo, J., Mora-Campos, D., Suarez-Serrano, A., Villalobos-Cháves, M., Salas-Jiménez, P., Gamboa-Jiménez, A., & Anchía-Leiton, D. (2017, Noviembre 13). Determinación de los niveles de arsénico presentes en sistemas de abastecimiento de agua de las regiones Chorotega y Huetar Norte de Costa Rica, América Central. San José, Costa Rica: Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).
- Hong Y-S., Song K-H., & Chung J-Y. (2014). *Health effects of chronic arsenic exposure*. *J Prev Med Public Health*, 245-52.
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1000000/>. (16 de 03 de 2024). Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1000000/>

- www.nhc.noaa.gov/: <https://www.nhc.noaa.gov/archive/2022/al13/al132022.public.012.shtml>
- Hughes MF., Beck BD., Chen Y., Lewis AS., & Thomas DJ. (2011). Arsenic exposure and toxicology: A historical perspective. *Toxicol Sci.*, 305-32.
- INETER. (2004). Mapa Geológico Minero de la República de Nicaragua. Escala 1:750,000. Managua, Nicaragua.
- INETER, & C. (2012). *Estudio de Potenciales y Calidad del Acuífero de Malpaisillo. Managua.* Managua.
- INETER, & M. (2014). *Estudio Hidrogeológico de los Acuíferos de la Cuenca Estero Real para el Manejo Sostenible de los Recursos de Agua Subterránea en Chinandega.* INETER, Dirección de Hidrogeología , Managua.
- INETER, A. U. (2014). *Delimitación de Cuencas Hidrográficas en Nicaragua bajo la metodología de Pfafstetter.* Managua.
- Jomova K., Jenisova Z., Feszterova M., Baros S., Liska J., & Hudecova D., et al. (2011). Arsenic: toxicity, oxidative stress and human disease. *Journal Applied Toxicology*, 95-107.
- Lillo, J. (2008). *Documentos GEMM* [www.aulados.net 2008.](https://www.aulados.net/2008/) (G. d. (GEMM), Editor) Obtenido de Documentos GEMM www.aulados.net 2008: https://www.aulados.net/GEMM/Documentos/Peligros_geoquimicos_As/Peligros_As_2.pdf
- Medina-Pizzali M., Robles P., Mendoza M., & Torres C. (2018). Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, 93-102. doi:doi: 10.17843/rpmesp.2018.351.3604.
- Mollinedo, N., & Vargas, I. (2019). Arsénico en suelos y rocas de origen volcánico en un área de Aguas Zarcas y La Palmera, zona norte de Costa Rica. *Ciencia y Tecnología*, 1(36), 23-36.
- Murray, J., Tapia, J., Ormachea, M., Tirado, N., & Nordstrom, K. (2023). Towards a comprehensive understanding of the “Origin, distribution, and biogeochemistry of arsenic in the Altiplano-Puna plateau of South America” with the IGCP-707 project. *Episodes*, 4(46), 653-664. doi:10.18814/epiugs/2023/023017
- NTON ISO/IEC . (2017). *Norma ISO/IEC 17025:2017 Requisitos Generales para*

la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración.

Parrone, D., Ghergo, S., Preziosi, E., & Casentini, B. (2022). Water-Rock Interaction Processes: A Local Scale Study on Arsenic Sources and Reliase Mechanisms from a volcanic rock matrix. *Toxics*, 288. doi:<https://doi.org/10.3390/toxics10060288>

Pizarro I., Gómez-Gómez M., León J., Román D., & Palacios MA. (2016). Bioaccessibility and arsenic speciation in carrots, beets and quinoa from a contaminated area of Chile. *Sci Total Environ*, 557-63.

Rangel, E., Hernández, L., Luévanos, M., & Balagurusamy, N. (Junio de 2015). Impact of arsenic on the environment and its microbial transformation. *Terra Latinoamericana*, 33, 48-68.

Saha JCJ., Dikshit AKA., Bandyopadhyay M., & Saha KC. (1999). A Review of Arsenic Poisoning and its Effects on Human Health. *Crit Rev Environ Sci Technol.*, 281-313.

Tsai, J., Sing, S., & Chen, W. (20). Arsenic metabolism by microbes in nature and the impact on arsenic remediation. *Biotechnology*, 659-667.

WHO. (2011). *Guías para la Calidad del Agua de Consumo Humano*. 4a. Edición que incorpora la primera ADENDA, Ginebra.