



DOI: <https://doi.org/10.46296/yc.v10i19.0995>

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDRÁULICA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y EL USO POTENCIAL DEL CO₂ DISUELTO, EN EL SECTOR SILLUNCHI, ECUADOR

HYDROGEOLOGICAL AND HYDRAULIC ASSESSMENT OF GROUNDWATER AND POTENTIAL USE OF DISSOLVED CO₂ IN THE SILLUNCHI SECTOR, ECUADOR

Párraga Ricardo Javier ¹; Alulema Rafael Alberto ²; Reyes-Zambrano Jimmy ³; Chavarría-Párraga Jesús ⁴

¹ Maestría en Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Portoviejo, Ecuador.
Correo: rjparraga@pucesm.edu.ec

² Maestría en Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Portoviejo, Ecuador.
Correo: ralulema@pucesm.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9634-3694>

³ Maestría en Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Portoviejo, Ecuador.
Correo: jlreyesz@pucesm.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0962-519X>

⁴ Maestría en Hidráulica, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Portoviejo, Ecuador.
Correo: jechavarria@pucesm.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8868-394X>

Resumen

El estudio evalúa indicadores hidrogeofísicos e hidroquímicos compatibles con la presencia de dióxido de carbono disuelto en el sector Sillunchi, cuenca del río San Pedro, en un entorno volcánico interandino influenciado por los complejos Rumiñahui y Pasochoa. Se integraron registros mensuales de precipitación de doce estaciones durante 2016–2024, seis sondeos eléctricos verticales con una profundidad de investigación aproximada de 200 m, observaciones geológicas y resultados fisicoquímicos de pozos y un manantial. La precipitación media anual fue de 1 376,35 mm, con un régimen bimodal. La interpretación geoeléctrica permitió diferenciar seis unidades hidrogeológicas y proponer un sistema de acuíferos compartimentado por fallas, que podrían favorecer la conexión entre dominios de flujo someros y profundos. Las aguas presentaron temperaturas de 22,5–28,1 °C, pH de 6,40–7,04 y conductividad eléctrica de 3 420–7 920 µS/cm, junto con concentraciones elevadas de sodio, magnesio, cloruro y sílice. Estos resultados son compatibles con mineralización, interacción agua–roca prolongada y circulación profunda. Sin embargo, la ausencia de mediciones directas de CO₂ disuelto, alcalinidad, presión parcial y registros completos de ensayos de bombeo impide cuantificar reservas o demostrar la viabilidad de recuperación comercial. El modelo permite priorizar zonas de verificación, pero el diseño de aprovechamiento requiere cuantificación de gases y ensayos hidráulicos controlados.

Palabras claves: acuífero volcánico; dióxido de carbono disuelto; sondeo eléctrico vertical; hidroquímica; circulación profunda; interacción agua–roca.

Abstract

This study evaluates hydrogeophysical and hydrochemical indicators consistent with the presence of dissolved carbon dioxide in the Sillunchi area of the San Pedro River basin, an inter-Andean volcanic setting influenced by the Rumiñahui and Pasochoa complexes. Monthly precipitation records from twelve stations for 2016–2024, six vertical electrical soundings with an investigation depth of approximately 200 m, geological observations, and physicochemical results from wells and a spring were integrated. Mean annual precipitation was 1,376.35 mm and followed a bimodal pattern. Geoelectrical interpretation identified six hydrogeological units and supported a conceptual model of a fault-compartmentalized aquifer system, with potential connections between shallow and deep flow domains. Water temperatures ranged from 22.5 to 28.1 °C, pH from 6.40 to 7.04, and electrical conductivity from 3,420 to 7,920 µS/cm, alongside

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 19 de mayo de 2026.

Fecha de aceptación: 20 de julio de 2026.

Fecha de publicación: 17 de septiembre de 2026.



elevated concentrations of sodium, magnesium, chloride, and silica. These findings are consistent with mineralization, prolonged water–rock interaction, and deep circulation. However, the absence of direct measurements of dissolved CO₂, alkalinity, CO₂ partial pressure, and complete pumping-test records prevents reserve estimation or demonstration of the feasibility of commercial recovery. The conceptual model supports the prioritization of targets for verification, but any development plan requires direct gas quantification and controlled hydraulic testing.

Keywords: volcanic aquifer; dissolved carbon dioxide; vertical electrical sounding; hydrochemistry; deep circulation; water–rock interaction.

1. Introducción

La circulación del agua subterránea en terrenos volcánicos depende de la disposición de las coladas, los depósitos piroclásticos, los materiales alterados y las discontinuidades estructurales. Esta heterogeneidad puede originar acuíferos superpuestos, niveles de baja permeabilidad y conexiones hidráulicas localizadas. Su caracterización requiere modelos conceptuales que integren evidencias geológicas, geofísicas e hidroquímicas, como señalan Baud et al. (2024) para los acuíferos andesíticos.

Las fracturas y fallas también pueden facilitar el ascenso de fluidos y gases de origen profundo. En el arco volcánico ecuatoriano se han identificado interacciones entre aguas de origen principalmente meteórico y gases profundos enriquecidos en CO₂, mediante análisis químicos e isotópicos de

aguas y gases (Inguaggiato et al., 2010). La incorporación de CO₂ al agua puede modificar el equilibrio ácido–base y favorecer la disolución mineral. No obstante, las variaciones del pH y de los solutos también pueden responder a la mezcla de aguas y a procesos hidrotermales, por lo que su interpretación requiere considerar varios mecanismos (Jiménez et al., 2024).

El sector Sillunchi, próximo a Machachi, se desarrolla sobre una secuencia volcánica y sedimentaria afectada por fallas y cuenta con antecedentes de producción de gas y agua mineralizada. La información disponible permite plantear un modelo hidrogeológico preliminar, aunque no incluye mediciones directas suficientes para cuantificar el CO₂ recuperable.

El objetivo de este trabajo es integrar información hidroclimática, geológica, geoeléctrica e hidroquímica para identificar



dominios de circulación subterránea compatibles con la presencia de CO₂ disuelto y establecer los estudios necesarios para evaluar su eventual aprovechamiento. El alcance corresponde a una evaluación conceptual de indicadores indirectos y no a una estimación de reservas.

2. Metodología

2.1 Área de estudio y fuentes de información

El área de estudio se localiza en el sector Sillunchi, cerca de Machachi, en la parte central de la cuenca del río San Pedro, Ecuador. El fondo del valle está limitado por relieves volcánicos y atravesado por el río San Pedro, dentro de un entorno interandino influenciado por los complejos Rumiñahui y Pasochoa.

La información integrada comprendió registros mensuales de precipitación de doce estaciones meteorológicas para el período 2016–2024, cartografía temática, observaciones de afloramientos, seis sondeos eléctricos verticales (SEV 15–20), resultados fisicoquímicos de aguas subterráneas y un manantial, y

antecedentes de producción de pozos. Los perfiles se interpretaron a lo largo de dos transectos: uno meridional, con los SEV 16–17–15, y otro septentrional, con los SEV 19–20–18. La profundidad de investigación geofísica reportada fue de aproximadamente 200 m.

2.2 Tratamiento de la precipitación

Se utilizó la media espacial de las doce estaciones para representar el comportamiento mensual de la precipitación. La precipitación media anual se obtuvo mediante la suma de las doce medias mensuales, de acuerdo con la ecuación 1.

$$\bar{P}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{m,i} ; \quad \bar{P}_{\text{annual}} = \sum_{m=1}^{12} \bar{P}_m$$

(1) Media mensual entre estaciones y precipitación media anual.

En esta expresión, $\bar{P}_m$ representa la precipitación media del mes m ; $P_{m,i}$, el valor medio de ese mes en la estación i ; $n = 12$, el número de estaciones; y $\bar{P}_{\text{annual}}$, la precipitación media anual.

Se identificó una inconsistencia de transcripción en la estación M730: el valor de diciembre, 1 241,84 mm, no

era compatible con el total anual de 1 377,54 mm. Se adoptó una corrección por cierre aritmético, restando al total anual la suma de los otros once meses, con lo que diciembre resultó en 154,34 mm. Esta corrección supone que el total anual y los demás valores mensuales son correctos. La media de diciembre entre estaciones quedó en 128,34 mm y se mantuvo la media anual de 1 376,35 mm.

2.3 Prospección e interpretación geoelectrica

Los sondeos eléctricos verticales se realizaron con un arreglo Schlumberger. La resistividad aparente se expresa mediante la relación entre la diferencia de potencial, la intensidad de corriente y el factor geométrico del dispositivo, como se indica en la ecuación 2.

$$\rho_a = K \left(\frac{\Delta V}{I} \right), \quad K = \pi \left[\frac{\left(\frac{AB}{2} \right)^2 - \left(\frac{MN}{2} \right)^2}{MN} \right]$$

(2) Resistividad aparente y factor geométrico del arreglo Schlumberger.

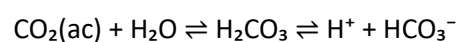
Donde ρ_a es la resistividad aparente; ΔV , la diferencia de potencial medida; I , la corriente inyectada; AB ,

la separación entre electrodos de corriente; MN , la separación entre electrodos de potencial; y K , el factor geométrico del arreglo.

La interpretación correlacionó los contrastes de resistividad con los materiales volcánicos cartografiados y con el comportamiento conceptual de acuíferos andesíticos. Los niveles de baja resistividad se consideraron compatibles con materiales saturados, finos, alterados o con agua mineralizada. Este criterio permite delimitar dominios conductores, pero no identificar por sí solo CO_2 disuelto ni demostrar permeabilidad aprovechable.

2.4 Análisis hidroquímico y criterios de evaluación

Se organizaron los valores mínimos, máximos y medios reportados para temperatura, pH, conductividad eléctrica, calcio, magnesio, sodio, cloruro, sulfato y sílice disuelta. La interpretación consideró el equilibrio simplificado del sistema de ácido carbónico:



Un pH ligeramente ácido y una mayor disolución mineral pueden ser compatibles con la incorporación de

CO₂; sin embargo, también pueden reflejar mezcla de aguas, salinidad, tiempo de residencia y procesos de interacción agua–roca. Por ello, los indicadores se evaluaron conjuntamente y se clasificaron como evidencia indirecta.

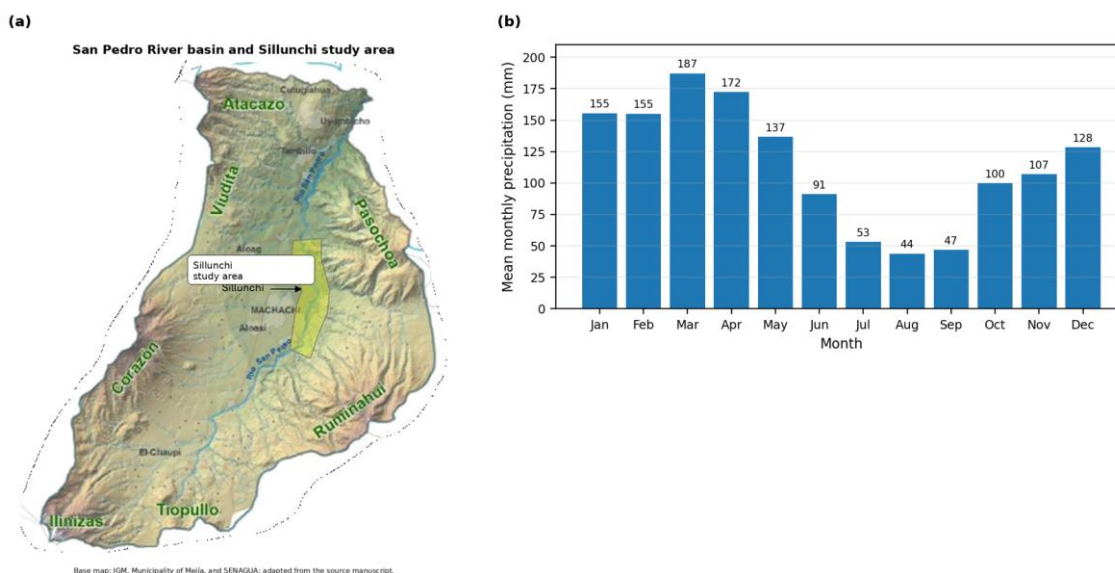
La viabilidad de aprovechamiento se consideró no demostrada mientras no se disponga de mediciones de CO₂ disuelto o de su presión parcial (pCO₂), alcalinidad, carbono inorgánico disuelto, relación gas–agua, presión en cabeza de pozo, caudal estable, abatimiento, recuperación y evolución de la calidad del agua durante pruebas controladas.

3. Resultados

3.1 Régimen de precipitación y contexto de recarga

La precipitación media anual fue de 1 376,35 mm. La distribución mensual mostró un régimen bimodal, con un período húmedo principal entre febrero y abril y un incremento secundario entre octubre y diciembre. Marzo presentó la mayor media mensual, con 187,07 mm, mientras que agosto registró la menor, con 43,90 mm. La figura 1 presenta la ubicación del área y la distribución mensual corregida.

Figura 1. (a) Cuenca del río San Pedro y área de estudio de Sillunchi. (b) Precipitación media mensual del período 2016–2024, con la corrección de diciembre para M730. Las barras muestran valores redondeados. Base cartográfica: IGM, Municipio de Mejía y SENAGUA, según la atribución incluida en la figura original.



La estacionalidad de la precipitación sugiere una disponibilidad variable de agua para la recarga. Sin embargo, estos registros no constituyen una estimación de recarga efectiva ni permiten establecer, por sí solos, cuándo alcanza el agua los niveles profundos.

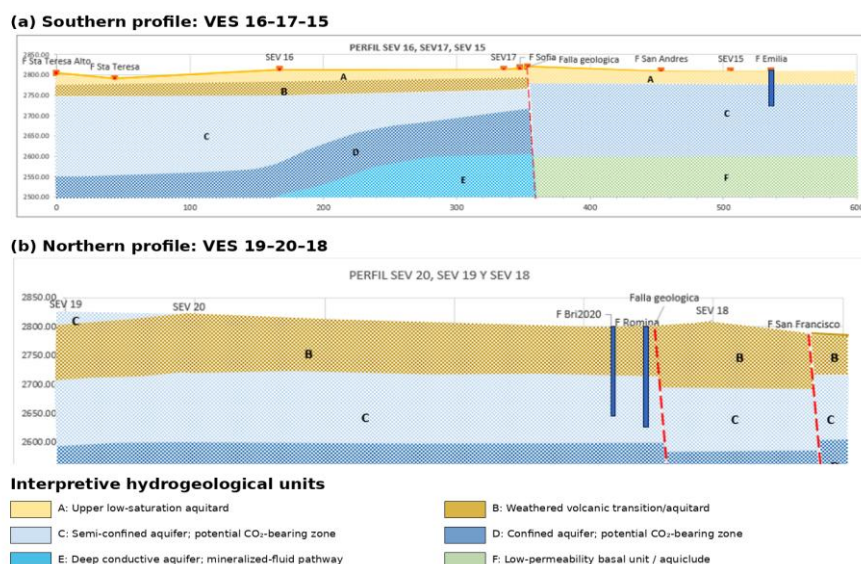
3.2 Arquitectura hidrogeológica interpretada

La integración de los perfiles permitió diferenciar seis unidades, identificadas con las letras A–F en la figura 2. Las unidades A y B corresponden a depósitos volcánicos superficiales y tobas meteorizadas, no saturados o

débilmente saturados, interpretados principalmente como acuitardos o materiales de transición.

La unidad C presenta resistividad moderada y un espesor considerable, por lo que se interpreta como un acuífero semiconfinado. Las unidades D y E constituyen cuerpos conductores profundos, compatibles con depósitos finos saturados, agua mineralizada y posible alteración hidrotermal. La unidad F admite una interpretación variable según la ubicación: roca volcánica consolidada y fracturada o una base de baja permeabilidad. Esta ambigüedad requiere comprobación mediante registros de perforación.

Figura 2. Perfiles hidrogeológicos interpretados: (a) sur, SEV 16–17–15; (b) norte, SEV 19–20–18. A: acuitardo superficial; B: material volcánico meteorizado de transición; C: acuífero semiconfinado; D: posible acuífero confinado; E: zona conductora profunda; F: unidad basal de comportamiento variable. Las menciones de CO₂ en la figura representan hipótesis, no mediciones directas de gas. La interpretación requiere verificación mediante perforaciones.





Las fallas representadas en ambos perfiles segmentan las unidades y podrían facilitar la circulación vertical. Su función hidráulica y la continuidad de los niveles acuíferos entre bloques permanecen sujetas a verificación.

3.3 Características fisicoquímicas del agua

Las temperaturas se situaron entre 22,5 y 28,1 °C, con una media de 25,2 °C. El pH varió entre 6,40 y 7,04, con una media de 6,75, correspondiente a condiciones ligeramente ácidas a próximas a la neutralidad. La conductividad eléctrica osciló entre 3 420 y 7 920 $\mu\text{S/cm}$, con una media de 5 800 $\mu\text{S/cm}$, indicativa de una mineralización elevada.

Tabla 1. Resumen de las características fisicoquímicas del agua y su interpretación hidrogeológica.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Media	Interpretación
Temperatura (°C)	22,5	28,1	25,2	Agua templada; posible circulación profunda
pH	6,40	7,04	6,75	Acidez compatible con CO ₂ , no exclusiva
CE ($\mu\text{S/cm}$)	3 420	7 920	5 800	Mineralización elevada
Ca ²⁺ (mg/L)	70	201	135	Disolución mineral o mezcla
Mg ²⁺ (mg/L)	191	653	402	Enriquecimiento en magnesio
Na ⁺ (mg/L)	415	1 161	788	Agua evolucionada o mezclada
Cl ⁻ (mg/L)	271	612	442	Posible aporte salino o profundo
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	35	107	71	Posible oxidación o fuente mineral
SiO ₂ (mg/L)	48	61	54	Interacción con rocas volcánicas

CE: conductividad eléctrica. Los valores son estadísticos agregados; no corresponden a una única muestra.

El sodio y el magnesio alcanzaron valores máximos de 1 161 y 653 mg/L, respectivamente. El cloruro varió entre 271 y 612 mg/L y la sílice entre 48 y 61 mg/L. El conjunto es compatible con interacción agua–

roca, mezcla con fluidos mineralizados y circulación profunda. La contribución relativa de cada proceso no puede cuantificarse a partir de estos valores agregados.

4. Discusión

4.1 Relación entre estructura geológica y circulación subterránea

El modelo conceptual propone un sistema de acuíferos superpuestos y compartimentados por fallas. La alternancia entre materiales volcánicos permeables y niveles de menor permeabilidad permite explicar la coexistencia de dominios someros, semiconfinados y profundos. Esta interpretación concuerda, en términos generales, con los modelos de acuíferos andesíticos descritos por Baud et al. (2024), aunque las propiedades hidráulicas locales deben comprobarse directamente.

Las discontinuidades podrían favorecer el intercambio entre niveles, pero su presencia no demuestra que funcionen como conductos. La conectividad debe evaluarse mediante registros de pozo y observaciones de la respuesta piezométrica durante ensayos hidráulicos. Asimismo, la distribución estacional de la lluvia puede verse amortiguada o retrasada por el almacenamiento y las propiedades del sistema.

Cuthbert et al. (2019) muestran que los tiempos de respuesta del agua subterránea dependen de la configuración y las características hidráulicas del acuífero; por ello, no es posible equiparar el régimen de lluvia con el de recarga profunda.

4.2 Alcance de los indicadores de dióxido de carbono

La mineralización, el pH y la sílice disuelta respaldan la hipótesis de un componente de agua evolucionada y de circulación profunda. En el arco ecuatoriano, Inguaggiato et al. (2010) identificaron aportes de gases profundos mediante mediciones químicas e isotópicas. En La Palma, Jiménez et al. (2024) relacionaron cambios hidroquímicos con mezcla de aguas e incorporación de CO₂ volcánico. Estos antecedentes sustentan la plausibilidad del mecanismo, pero no prueban que opere con la misma intensidad en Sillunchi.

El pH no constituye un indicador exclusivo de CO₂ y la conductividad eléctrica no diferencia entre aguas carbonatadas y aguas salinas sin enriquecimiento significativo de gas. De igual manera, una zona de baja resistividad puede corresponder a



arcillas o materiales alterados de escasa permeabilidad. En consecuencia, las unidades C–E representan objetivos de verificación hidrogeológica e hidroquímica, sin que puedan clasificarse todavía como reservorios de gas confirmados.

La ausencia de bicarbonato cuantificado, alcalinidad, carbono inorgánico disuelto y análisis de gases impide caracterizar el sistema carbonato y estimar el contenido de CO₂ recuperable. Además, no se dispone de un registro completo de las condiciones de muestreo ni de series hidráulicas suficientes para establecer rendimientos de explotación. Estas limitaciones restringen las conclusiones al nivel de un modelo conceptual.

4.3 Implicaciones para la exploración y el diseño de pozos

Los intervalos conductores de mayor espesor próximos a las fallas constituyen objetivos iniciales de exploración, siempre que la perforación confirme la presencia de materiales permeables y descarte el predominio de arcillas. La primera etapa debe incluir registros litológicos y geofísicos continuos,

aislamiento de los intervalos de captación y muestreo de agua y gas con control de la desgasificación hacia la atmósfera.

Posteriormente, los ensayos de bombeo a caudal constante y de recuperación deben permitir estimar transmisividad y almacenamiento, con métodos adecuados para la heterogeneidad de los acuíferos volcánicos, como los considerados por Nigate et al. (2025). Durante estas pruebas deben registrarse simultáneamente caudal, abatimiento, recuperación, presión en cabeza de pozo, CO₂ disuelto, alcalinidad, carbono inorgánico disuelto, composición iónica y composición del gas.

Los límites de extracción deben establecerse a partir de la respuesta hidráulica observada. Una red de monitoreo distribuida entre los principales bloques de falla permitiría evaluar propagación de presiones, intercambio vertical y cambios en la composición del agua. La selección de materiales resistentes a la corrosión y de equipos de desgasificación controlada deberá sustentarse en concentraciones, presiones y caudales comprobados.

5. Conclusiones

El sector Sillunchi se interpreta como un sistema volcánico de acuíferos superpuestos, segmentado por fallas, con niveles superficiales de baja permeabilidad, una unidad semiconfinada y zonas conductoras profundas. La precipitación media anual de 1 376,35 mm y su distribución bimodal describen el contexto hidroclimático, pero no cuantifican la recarga efectiva de los niveles profundos.

La temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, los iones mayoritarios y la sílice son compatibles con agua mineralizada, interacción agua–roca prolongada y circulación profunda. Su interpretación conjunta permite proponer una posible influencia de CO₂ disuelto y de procesos hidrotermales, sin atribuir de forma exclusiva las anomalías a estos mecanismos.

La evidencia disponible permite priorizar intervalos para exploración, pero no demuestra una reserva recuperable de CO₂ ni la viabilidad de su aprovechamiento comercial. Antes de estimar rendimientos, diseñar pozos o definir límites de

extracción, se requieren mediciones directas del gas y del sistema carbonato, verificación litológica y ensayos controlados de bombeo y recuperación.

Bibliografía

- Baud, B., Lachassagne, P., Dumont, M., Toulhier, A., Hendrayana, H., Fadillah, A., y Dorfliger, N. (2024). Review: Andesitic aquifers—hydrogeological conceptual models and insights relevant to applied hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 32, 1259–1286. <https://doi.org/10.1007/s10040-024-02784-0>
- Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K. M., Schneider, A., Hartmann, J., y Lehner, B. (2019). Global patterns and dynamics of climate–groundwater interactions. *Nature Climate Change*, 9, 137–141. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4>
- Inguaggiato, S., Hidalgo, S., Beate, B., y Bourquin, J. (2010). Geochemical and isotopic characterization of volcanic and geothermal fluids discharged from the Ecuadorian volcanic arc. *Geofluids*, 10, 525–541. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2010.00315.x>



Jiménez, J., Gasco Caveró, S., Marazuela, M. Á., Baquedano, C., Laspidou, C., Santamarta, J. C., y García-Gil, A. (2024). Effects of the 2021 La Palma volcanic eruption on groundwater hydrochemistry: Geochemical modelling of endogenous CO₂ release to surface reservoirs, water-rock interaction and influence of thermal and seawater. *Science of the Total Environment*, 929, 172594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172594>

Nigate, F., Yenehun, A., Belay, A. S., Asmamaw, D. K., y Walraevens, K. (2025). Application of pumping tests to estimate hydraulic parameters of volcanic aquifers in Lake Tana Basin, Ethiopia. *Water*, 17(1), 9. <https://doi.org/10.3390/w17010009>