

Implementación de metodologías analíticas para la caracterización de aguas geotérmicas para aplicación en usos directos

Implementation of analytical methodologies for characterization of geothermal waters for direct uses



Diana Robles-Chaves¹, Olman Alberto Arias-Molina²

Fecha de recepción: 3 de marzo de 2021

Fecha de aprobación: 18 de julio de 2021

Robles-Chaves, D; Arias-Molina, O. A. Implementación de metodologías analíticas para la caracterización de aguas geotérmicas para aplicación en usos directos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 35-2. Abril-Junio 2022. Pág 16-26.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v35i2.5561>

- 1 Maestría en Ciencia y Tecnología para la Sostenibilidad. Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: drobles@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-8173-9610>
- 2 Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Costa Rica. Correo electrónico: oariasm@ice.go.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8870-9476>



Palabras clave

Agua geotermal; exploración; geoquímica; geotermómetro; validación; robustez; Costa Rica.

Resumen

En Costa Rica se han identificado importantes campos geotermales con temperaturas inferiores a los 150 °C, que han sido poco explorados, y su uso es prácticamente exclusivo para baños termales; dejándose de lado importantes aplicaciones en usos directos donde se utiliza el calor de este recurso, para sistemas de climatización, acuicultura, deshidratación, entre otros. En esta investigación, se seleccionaron seis sitios de agua geotérmica en la zona de Cartago con temperaturas superficiales en un rango entre (43 - 61) °C, y se determinó que la totalidad de las muestras son clasificadas como aguas salobres con una composición predominante de tipo ($\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$) o ($\text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$), las cuales podrían presentar problemas de corrosión o incrustación. Se estimó que el geotermómetro de SiO_2 es el más adecuado para estimar las temperaturas del reservorio las cuales se encuentran en el rango entre (75 - 83) °C. La validez de las metodologías analíticas empleadas fue demostrada realizando enriquecimientos con material de referencia en esta matriz, obteniéndose porcentajes de recuperación entre (85-119)%.

Keywords

Geothermal water; exploration; geochemistry; geothermometer; validation; ruggedness; Costa Rica.

Abstract

In Costa Rica, important geothermal fields were found with temperatures below 150 °C. There has been little exploration in this fields and their use are exclusively for thermal baths. Excluding important applications in direct uses, such as air conditioning systems, aquaculture, dehydration, among others. Six geothermal water sites were selected in Cartago with surface temperatures between (43 - 61) °C. All the samples studied are classified as brackish waters with a predominant composition of ($\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$) or ($\text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$), which could present corrosion or scaling problems. The SiO_2 geothermometer is the most suitable for estimating the reservoir temperature which are in the range between (75 - 83) °C. The analytical results were validated by recovery tests with reference material on the matrix under study, obtaining recovery percentages between (85-119) %.

Introducción

El rápido incremento de la población, ha ocasionado un aumento en el requerimiento energético y con ello un aumento de las emisiones dióxido de carbono (CO_2) y otros gases de efecto invernadero, considerados entre los principales causantes del cambio climático. Es por esto, que se ha promovido la investigación en energías limpias, como es la hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica, biomásica y oceánica, las cuales permiten reducir el uso de combustibles fósiles. [1] [2]

En lo que respecta a energía geotérmica, esta es utilizada y clasificada según la temperatura del reservorio; se habla de geotermia de muy baja temperatura cuando la temperatura es < 25 °C, baja temperatura (25-90) °C, temperatura media (90-150) °C y temperaturas altas con $T > 150$ °C. [3] En el caso de Costa Rica el uso mayoritario se da en los fluidos termales de alta temperatura para la generación de energía eléctrica; los fluidos de baja y media temperatura

son utilizados exclusivamente en balneología, [4] desaprovechándose importantes alternativas para el usos de este calor, ya que estos fluidos tiene la ventaja de presentar temperaturas constantes a lo largo del año, al no verse afectados por los cambios estacionales. [5]

A nivel mundial se han desarrollado diversos usos directos para el agua termal, tanto en sistemas abiertos como cerrados. Entre ellos se menciona la climatización de espacios con aire acondicionado o calefacción, control de temperatura en invernaderos en donde permite mejorar la eficiencia de las cosechas y la producción de cultivos en zonas no endémicas. [6] También se utiliza en procesos productivos como acuicultura de trucha, salmón, tilapia, langosta, entre otros, así como, en la deshidratación de frutas y vegetales, que permite aumentar la vida útil de estos productos. [7]

Para poder hacer uso del calor presente en el agua termal, es necesario conocer la composición del fluido, sus características y la temperatura del reservorio; esto permite definir los materiales que se deben utilizar y evaluar la factibilidad del sistema; esta etapa permite reducir costos de perforación y exploración. [8] Para esto, se utilizan geotermómetros que son ecuaciones que emplean la concentración de ciertos elementos para estimar la temperatura del reservorio. [9] Existe gran cantidad de geotermómetros desarrollados a lo largo del tiempo, los cuales son aplicables en diferentes rangos de temperaturas y bajo diversas condiciones de equilibrio entre el agua termal y las rocas. [10]

Se utilizan también en la fase de exploración diagramas triangulares de aniones y cationes que permiten trazar los orígenes de las fuentes, así como, conocer los principales procesos geoquímicos que ocurren. [10] Entre los diagramas ternarios más utilizados se encuentra el de Na–K–Mg propuesto por Giggenbach (1988), el cual permite evaluar el equilibrio agua–mineral e identificar el tipo de aguas entre completamente equilibradas, parcialmente equilibradas (mezcladas) o inmaduras y permite estimar la temperatura del reservorio. [11] El diagrama ternario de Cl–SO₄–HCO₃ (Giggenbach 1991) permite relacionar el contenido de estos aniones con los procesos que experimenta el fluido en su ascenso a la superficie; clasificando los yacimientos termales en origen volcánico si la composición es elevada en sulfatos, maduras si poseen elevado contenido de cloruros, pluvial (periféricas) si presentan contenidos importantes de carbonato/bicarbonato o calentadas por vapor geotérmico. [12]

En este estudio se lleva a cabo una verificación de las metodologías analíticas empleadas en el análisis de agua termal, que permite validar los resultados obtenidos, así como la caracterización fisicoquímica de las aguas ubicadas en la zona de Cartago. Esto con el fin conocer el origen de las fuentes y evaluar su posible potencial para implementar usos directos con este recurso.

Materiales y métodos

Sitios de muestreo

Para este estudio se llevó a cabo la recolección de seis muestras de origen geotermal en la zona de Cartago; se seleccionaron estos sitios ya que se ubican en las cercanías a zonas hoteleras donde la geotermia de baja entalpía podría tener importantes aplicaciones.

Recolección y composición química de las aguas

Para la recolección y análisis de las muestras se utilizó las metodologías analíticas propuestas en el Standard methods for the examination of water and wastewater [13], pero debido a que estas no son propias para la matriz en estudio se realizaron pruebas de robustez con el fin de evaluar si son apropiadas.

En el sitio de muestreo se realizó la determinación de temperatura, conductividad y pH. Luego de la recolección de las muestras, se realizó una filtración al vacío empleando un filtro de 0,45 µm. Las muestras fueron almacenadas en refrigeración a una temperatura < 4°C y aquellas utilizadas para el análisis de metales se preservaron añadiendo ácido nítrico (HNO₃) hasta pH < 2. La determinación de cloruros (Cl⁻) se realizó mediante un método volumétrico utilizando una disolución de nitrato de plata (AgNO₃) 0,01 mol/L y cromato de potasio (K₂CrO₄) como indicador. Las concentraciones de carbonato (CO₃²⁻) y bicarbonato (HCO₃⁻) fueron determinadas mediante valoración con ácido clorhídrico (HCl) 0,1 mol/L utilizando como indicadores fenolftaleína y la mezcla de verde de bromocresol y rojo de metilo. La concentración de sulfato (SO₄²⁻) se analizó mediante un método turbidimétrico con cloruro de bario (BaCl₂) a una absorbancia de 420 nm. El sílice soluble (SiO₂) fue determinado por colorimetría con molibdato de amonio ((NH₄)₆Mo₇O₂₄) y el boro (B) para generar color con reactivo de carmín. Para estas metodologías se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis marca Thermo Scientific.

Las concentraciones de calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), potasio (K⁺), sodio (Na⁺), hierro total (Fe) y manganeso total (Mn) fueron determinadas por espectrofotometría de absorción atómica de llama utilizando un equipo marca PerkinElmer modelo AAnalyst 800. La determinación de arsénico total (As) y Litio (Li⁺) también se realizaron con este equipo, pero por la técnica de horno de grafito.

Verificación de las metodologías

Para los estudios de robustez se realizaron enriquecimientos con material de referencia certificado sobre matriz de agua geotermal para los componentes mayoritarios. Se estableció como criterio para considerar que las metodologías eran adecuadas un porcentaje recuperación entre (80-120) %. Para este estudio se seleccionaron al menos 2 fuentes de agua termal diferentes y se aplicaron recuperaciones en ambas. [14]

Adicionalmente, se analizó la precisión en los análisis, para lo cual, todas las muestras fueron analizadas por duplicado y se estableció como criterio de aceptación un coeficiente de variación < 10 %. [14]

Análisis de los datos

Para asegurar la validez de los resultados obtenidos se realizó un análisis de balance iónico mediante la fórmula (1), donde el error de balance iónico para aguas de tipo termal usualmente se considera apropiado si es inferior al 10 %. [15]

$$\% \text{ Balance} = \left[\frac{\sum(m_i z_i)_{\text{cationes}} - \sum(m_i z_i)_{\text{aniones}}}{[\sum(m_i z_i)_{\text{cationes}} + \sum(m_i z_i)_{\text{aniones}}] \div 2} \right] * 100 \quad (1)$$

El cálculo de balance iónico y la elaboración de diagramas ternarios se realizó con la hoja de cálculo desarrollada por la Universidad de Standford [16], y la estimación de la temperatura de los reservorios mediante geotermómetros se utilizó el programa SolGeo [17] que permite estimar porcentajes de error.

Con el fin de estimar la capacidad de corrosión e incrustaciones a partir de la química de aguas obtenida, se utilizó el índice de saturación de Langelir (LSI) fórmula (2) [18]

$$LSI = pH - pHs \quad (2)$$

$$pHs = -\log \left\{ \frac{K_{a2} * \gamma_{Ca^{2+}} * [Ca^{2+}] * \gamma_{HCO_3^-} * [HCO_3^-]}{K_{sp}} \right\} \quad (3)$$

Donde:

K_{a2} : constante de equilibrio de disociación del bicarbonato

γ : coeficientes de actividad

K_{sp} : constante del producto de solubilidad de carbonato de calcio (CaCO_3).

Los resultados obtenidos mediante estas fórmulas fueron interpretados según la escala que se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación según índice de Langelier. [19].

LSI	
LSI < 0	Aguas no saturadas en CaCO_3 , que tiene tendencia a generar corrosión.
LSI = 0	Agua en equilibrio, no existe corrosión ni incrustaciones.
LSI > 0	Agua sobresaturada en CaCO_3 , con formación de incrustaciones.

Los análisis fisicoquímicos fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) del Tecnológico de Costa Rica.

Resultados y discusión

La figura 1 muestra la ubicación de los sitios de muestreo en la zona de Cartago. El punto denominado RP1 se ubica en las cercanías al río Agua Caliente y a la construcción de un proyecto hotelero. Los puntos de muestreo denominados RP2, RP3, RP4, RP5 y RP6 se encuentran dentro de las instalaciones del Hotel Río Perlas en Dulce Nombre.

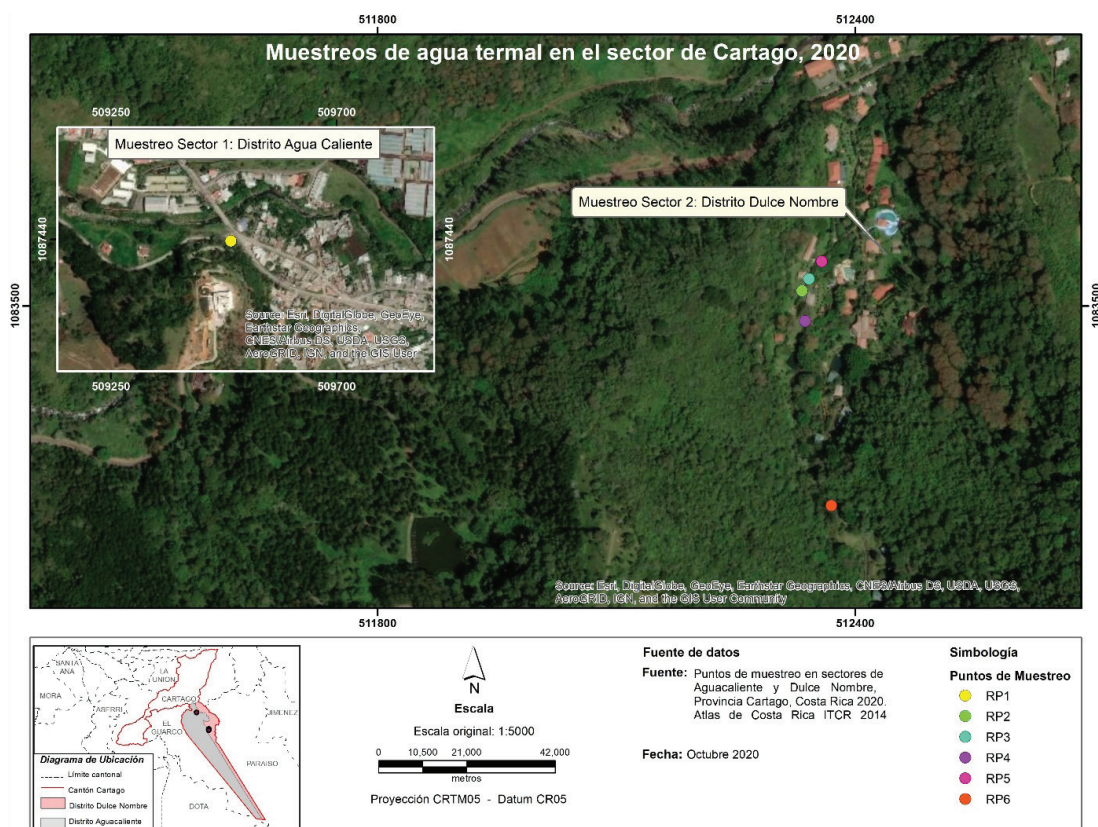


Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreos de agua termal.

El cuadro 2 muestra los resultados obtenidos en el análisis fisicoquímico de la composición de las aguas de origen termal para los compuestos mayoritarios y el cuadro 3 algunos elementos minoritarios.

Cuadro 2. Composición mayoritaria de aniones y cationes en las aguas termales.

Muestra	pH	Temp. (°C)	Conductividad (µS/cm)	Sólidos disueltos (mg/kg)	Cl ⁻ (mg/kg)	CO ₃ ²⁻ (mg/kg)	HCO ₃ ⁻ (mg/kg)	SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	Na ⁺ (mg/kg)	K ⁺ (mg/kg)	Ca ²⁺ (mg/kg)	Mg ²⁺ (mg/kg)	Dureza (mg/kg)
RP1	6,33	44,8	4 910	2 412	485	< 1	745	459	681	40	182	32	586
RP2	8,43	60,7	3 103	1 430	68	< 1	19	870	267	6	184	0,12	460
RP3	8,40	53,1	2 699	1 356	64	< 1	9	819	298	6	175	0,30	438
RP4	7,17	42,1	2 319	1 372	62	< 1	14	784	267	16	171	0,81	428
RP5	8,22	45,7	2 566	1 431	68	< 1	18	924	306	8	184	0,21	460
RP6	8,40	43,2	2 319	1 232	58	< 1	21	846	327	5	150	0,14	375

Cuadro 3. Composición de elementos minoritarios en las aguas termales.

Muestra	Manganeso (mg/kg)	Hierro (mg/kg)	Boro (mg/kg)	Arsénico (mg/kg)	Sílice (mg/kg)	Litio (mg/kg)
RP1	< 0,09	< 0,2	1,6	0,24	32	0,460
RP2	< 0,09	< 0,2	1,5	< 0,005	31	0,056
RP3	< 0,09	< 0,2	1,8	< 0,005	30	0,057
RP4	0,12	0,20	1,4	< 0,005	28	0,054
RP5	< 0,09	< 0,2	2,1	< 0,005	29	0,061
RP6	0,15	< 0,2	1,8	< 0,005	27	0,061

El rango de temperaturas superficiales encontrado va de (42 a 61) °C, siendo la mayor temperatura encontrada en RP2 en el distrito de Dulce Nombre. Se detectó también que las muestras recolectadas en Dulce Nombre tienen pH más alcalino que la recolectada en Agua Caliente.

El cuadro 4 evidencia que los porcentajes de error del balance iónico obtenido son < 10 % por lo que los datos son adecuados para ser utilizados al realizar análisis geotérmicos.

Cuadro 4. Balance iónico obtenido por muestra.

Muestra	Error balance iónico (%)
RP1	9
RP2	2
RP3	7
RP4	6
RP5	3
RP6	5

El cuadro 5 muestra los rangos de recuperación obtenidos para cada parámetro evaluado al realizar el enriquecimiento sobre matriz. Los cuales se encuentran entre (80-120) % con lo que se confirma la validez de las metodologías analíticas empleadas para las aguas termales en estudio.

Cuadro 5. Porcentaje de recuperación obtenido en el ensayo de robustez para evaluar el efecto de la matriz.

Parámetro	Recuperación (%)
Cloruros	(87 – 105)
Sulfatos	(106 - 111)
Sodio	(88 - 116)
Potasio	(99- 114)
Calcio	(96- 106)
Magnesio	100
Manganeso	(88 - 119)
Hierro	(85 - 101)
Arsénico	(94 – 103)

Mediante el diagrama de Piper (figura 2) se pudo clasificar las aguas según la composición de los cationes y aniones mayoritarios, en este caso se evidencian dos grupos. La muestra RP1 se clasifica como $(\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+)$, mientras que las muestras RP2, RP3, RP4, RP5 y RP6 se clasifican como $(\text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+)$.

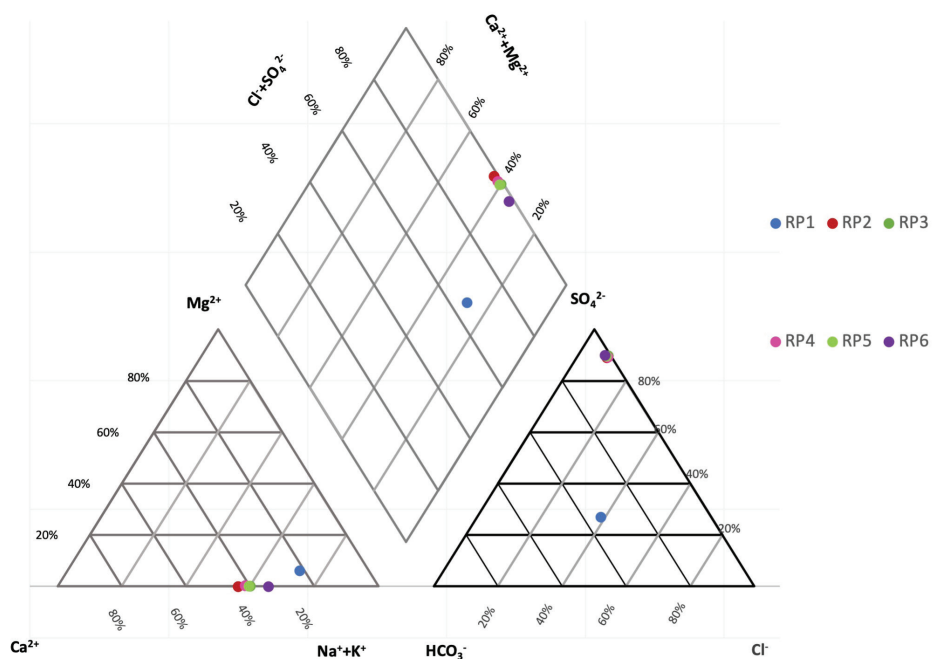


Figura 2. Diagrama de Piper que muestra la variabilidad de las muestras en las zonas de estudio.

En el diagrama ternario de $\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{HCO}_3$ que se muestra en la figura 3, se observa que la mayoría de las muestras son sulfatadas, esto indica que son muestras inmaduras, cercanas a la fuente de calor, mientras que, la muestra RP1 es clasificada como agua periférica, por su elevado contenido de bicarbonato, la cual a pesar de que han interactuado con la roca no alcanzan el equilibrio [11].

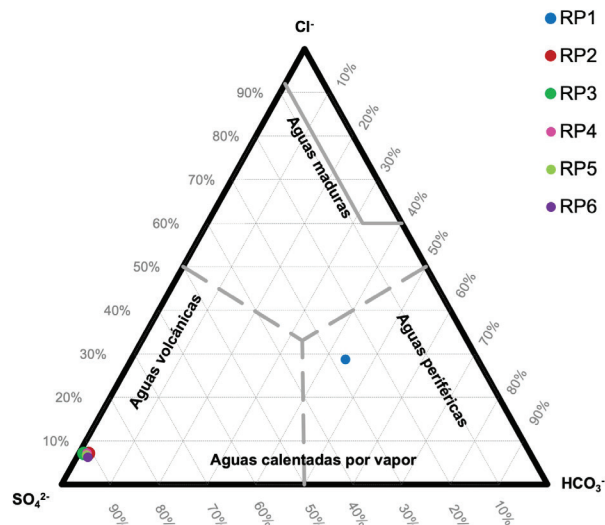


Figura 3. Diagrama ternario Cl-SO₄-HCO₃.

En la figura 4 se evidencia el diagrama ternario de Na-K-Mg donde se puede clasificar la muestra RP1 como agua inmadura, que presentan una importante mezcla con aguas superficiales y que su origen está relacionado a un reservorio de baja o mediana entalpía. Es importante indicar que al ser aguas que no han alcanzado el equilibrio pueden presentarse reacciones de intercambio iónico con minerales arcillosos, por lo que, para este tipo de aguas no es recomendable aplicar geotermómetros catiónicos [20]; por otro lado, se ubica otro grupo que corresponde a aguas parcialmente equilibradas al cual pertenecen las muestras restantes, estas presentan un rango de temperaturas entre (110- 140) °C, excepto la muestra identificada como RP4 que indica una temperatura de 200 °C aproximadamente.

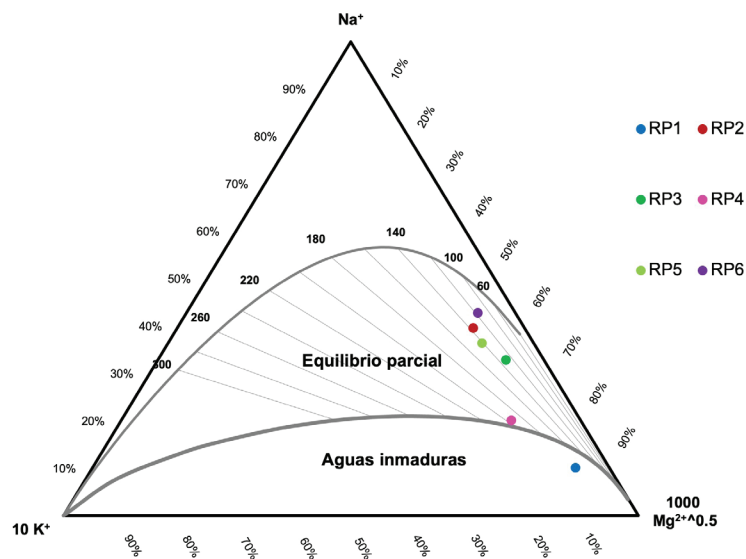


Figura 4. Diagrama ternario Na-K-Mg.

Según el contenido de sólidos totales disueltos (cuadro 2) todas las aguas fueron clasificadas como salobres, ya que presentan un contenido en el rango de (1 000 a 10 000) mg/kg. [21] Adicionalmente, al calcular la capacidad corrosiva o incrustante según el índice de saturación

de Langelier (LSI) se obtienen los resultados indicados en el cuadro 6. Estos resultados permiten identificar que en caso de implementar un sistema de intercambio de calor con estas aguas debe valorarse el material con el cual estará en contacto el agua termal, ya que en algunos casos puede generar problemas por corrosión o incrustaciones. También estos resultados permiten valorar la necesidad de añadir algún compuesto inhibidor que evite la precipitación de sales que ocasionen pérdidas en la eficiencia del proceso.

Cuadro 6. Índice de Langelier para los sitios en estudio.

Punto	LSI	Clasificación
RP1	-0,04	Aguas no saturadas que tiene tendencia a generar corrosión
RP2	0,84	Agua sobresaturada con formación de incrustaciones.
RP3	0,34	Agua sobresaturada con formación de incrustaciones.
RP4	-0,90	Aguas no saturadas que tiene tendencia a generar corrosión.
RP5	0,35	Agua sobresaturada con formación de incrustaciones.
RP6	0,48	Agua sobresaturada con formación de incrustaciones.

En esta investigación se emplearon diferentes geotermómetros para estimar la temperatura del reservorio y se comparó los porcentajes de error obtenidos utilizando el programa SolGeo, para evaluar cual es el más adecuado. En este caso los geotermómetros catiónicos, como es el de Na/K muestran porcentajes de error más elevados, ya que como se indicó anteriormente no son recomendados en sistemas que no se encuentran en el equilibrio. Por lo tanto, para este tipo de muestras se suelen utilizar los geotermómetros de sílice; los cuales tienen su fundamento según la fase predominante, ya sea cuarzo, calcedonia, cristobalita o sílice amorfa. [22] Las temperaturas obtenidas utilizando los geotermómetros de cuarzo son similares para todas las muestras, y son las que presentan los menores porcentajes de error en todos los sitios de muestreo. (cuadro 7)

Cuadro 7. Temperatura del reservorio según diversos geotermómetros.

Geotermómetro	Referencia	RP1	RP2	RP3	RP4	RP5	RP6
SiO ₂	Verma and Santoyo 1997	83 (3)	82 (3)	80 (3)	77 (3)	79 (3)	76 (3)
SiO ₂	Fournier 1977	82	81	79	77	78	75
SiO ₂	Fournier and Potter 1982	83 (4)	81 (4)	80 (4)	77 (4)	79 (4)	76 (4)
Na-K-Ca	Fournier and Truesdell 1973	158	103	101	196	111	93
Na/K	Fournier 1979	175 (49)	115 (40)	110 (39)	177 (49)	121 (41)	96 (37)
Na/K	Díaz-González et al 2008	142 (10)	74 (8)	68 (7)	144 (10)	83 (8)	53 (7)
Na/K	Giggenbach 1988	193	136	130	194	144	117
Na/K	Arnórsson 2000	160	105	100	161	112	87
Na/K	Verma & Santoyo 1997	180 (39)	122 (32)	116 (31)	181 (39)	130 (33)	103 (30)

*Entre paréntesis se muestra el porcentaje de error para algunos geotermómetros utilizando el programa SolGeo [17].

Conclusiones y/o recomendaciones

Se demostró la validez de las metodologías analíticas mediante pruebas de robustez realizando enriquecimientos con material de referencia en la matriz de agua termal, obteniéndose porcentajes de recuperación en el rango de (85 – 119) %, lo que confirma que son adecuadas.

Se observó una importante variabilidad en los resultados obtenidos para los diferentes geotermómetros, pero al utilizar el programa SolGeo se evidencia que el de sílice muestra los menores porcentajes de error con un rango entre (3 – 4) %, por lo que resulta ser el más adecuado para estimar la temperatura a la que se encuentra cada uno de los reservorios.

El rango de temperaturas obtenido para los reservorios se encuentra entre (75 - 83) °C, lo cual indica que todas las aguas estudiadas son de baja temperatura, con la diferencia que la muestra RP1 se encuentra mezclada con aguas superficiales, mientras que las restantes cinco son aguas cercanas a la fuente de calor.

La caracterización realizada también permite evidenciar mediante el uso del Índice de Langelier que las muestras RP1 y RP4 pueden generar problemas de corrosión, mientras que las muestras RP2, RP3, RP5 y RP6 pueden generar problemas por la formación de incrustaciones por su alto contenido de sulfatos asociado a la proximidad con la fuente de calor. Es por esto que, en caso de implementar sistemas de uso directo, para extraer el calor del yacimiento se recomienda evaluar la posibilidad de utilizar inhibidores, que eviten daños en los intercambiadores de calor o en las tuberías en caso de utilizar acero, que disminuyan la eficiencia del sistema.

Referencias

- [1] D. Milenic, P. Vasiljevic y A. Vrajes, «Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes,» *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 649-657, 2010.
- [2] M. Sener y A. Baba, «Geochemical and hydrogeochemical characteristics and evolution of Kozakli geothermal fluids, Central Anatolia, Turkey,» *Geothermics*, vol. 80, pp. 69-77, 2019.
- [3] M. E. Carro Pérez, A. Peiretti y F. M. Francisca, «Energía geotérmica de baja entalpía en suelosLoéssicos: cálculo y diseño para caso de estudio,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 22, pp. 04-23, 2018.
- [4] G. E. Alvarado y A. G. Vargas, «Historia del descubrimiento y aprovechamiento de las fuentes termales en Costa Rica,» *Revista Geológica de América Central*, vol. 57, pp. 55-84, 2017.
- [5] H. Quick, J. Michael, U. Arslan y H. Huber, «Geothermal application in low-enthalpy regions,» *Renewable Energy*, vol. 49, pp. 133-136, 2013.
- [6] A. Jasso, «Invernadero geotérmico de baja entalpía para cultivo de Jitomates,» 2016. [En línea]. Available: <https://colecciondigital.cemiego.org/xmlui/handle/123456789/496>.
- [7] M. Van Nguyen, S. Arason, M. Gissurarson y P. Gunnar, «Uses of geothermal energy in food and agriculture. Opportunities for developing countries,» [En línea]. Available: FAO.
- [8] M. Battistel, S. Hurwitz, W. Evans y M. Barbieri, «The chemistry and isotopic composition of waters in the low-enthalpy geothermal system of Cimino-Vico Volcanic District, Italy,» *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 328, pp. 222-229, 2016.
- [9] R. Chandrajith, J. A. Barth, N. Subasinghe, D. Merten y C. Dissanayake, «Geochemical and isotope characterization of geothermal spring waters in Sri Lanka: Evidence for steeper than expected geothermal gradients,» *Journal of Hydrology*, vol. 476, pp. 360-369, 2013.
- [10] S. Chatterjee, U. K. Sinha, A. Jaryal y S. Patbaje, «Multicomponent Versus Classical Geothermometry: Applicability of Both Geothermometers in a Medium-Enthalpy Geothermal System in India,» *Aquatic Geochemistry*, vol. 25, pp. 91-108, 2019.
- [11] H. Chenaker, B. Houha y V. Vincent, «Hydrogeochemistry and geothermometry of thermal water from north-eastern Algeria,» *Geothermics*, vol. 75, pp. 137-145, 2018.
- [12] O. Salas, «Aprovechamiento del recurso geotérmico en la estabilización de la temperatura del agua para el proceso de incubación de Alevines de tilapia en estanques con recirculación,» 2019.
- [13] APHA, *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, vol. 23, R. B. Baird, A. D. Eaton y R. W. Eugene, Edits., Washington DC, 2017.
- [14] AOAC, *Appendix F: Guidelines for Standard Method Performance Requirements*, vol. 20, 2016.
- [15] J. Kania, «Geochemical interpretation of thermal fluids from low-temperature wells in Stykkishólmur, W-Iceland and Pyrzyce, NW-Poland,» de *Geothermal Trininng Programme*, Reykjavik, 2003.

- [16] T. Powell y W. Cumming, «Spreadsheets for geothermal water and gas geochemistry,» 2010. [En línea]. Available: <https://catalog.data.gov/dataset/spreadsheets-for-geothermal-water-and-gas-geochemistry-constructing-geothermometry-reports>. [Último acceso: 13 09 2020].
- [17] S. P. Verma, K. Pandarinath y E. Santoyo, «SolGeo: a new computer program for solute geothermometers and its application to Mexican geothermal fields. Geothermics,» *Geothermics*, vol. 37, nº 6, pp. 597-621, 2008.
- [18] A. Sharma, B. Agnihotri, S. Vemavarapu y A. B. Gupta, «Chemistry of inorganic scaling in full-scale reverse osmosis plants treating brackish groundwater,» *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, 2020.
- [19] Carrier Air Conditioning Com, Handbook of Air Conditioning System Design, New York: McGraw-Hill Books, 1965.
- [20] P. Hernández Morales y J. Wurl, «Hydrogeochemical characterization of the thermal springs in northeastern of Los Cabos Block, Baja California Sur, México,» *Environ Sci Pollut Res*, vol. 24, pp. 1384-13202, 2017.
- [21] M. O. Awaleh, T. Boschetti, A. E. Adaneh, M. A. Daoud, M. M. Ahmed, O. A. Dabar, Y. D. Soubaneh, A. D. Kwalieh y I. H. Kadieh, «Hydrochemistry and multi-isotope study of the waters from Hanlé-Gaggadé grabens (Republic of Djibouti, East African Rift System): A low-enthalpy geothermal resource from a transboundary aquifer,» *Geothermics*, vol. 86, 2020.
- [22] A. C. Cerpa, «Caracterización del potencial geotérmico a partir de análisis geoquímicos de fuentes termales, en el volcán Cerro Machín, Colombia,» 2018. [En línea]. Available: https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2250/1/CerpaAngie_2018_CaracterizacionPotencialGeotermico.pdf. [Último acceso: 25 10 2020].
- [23] W. D. Weight, Hydrogeology Field Manual, vol. 2, Mc Graw Hill, 2008.
- [24] S. Self, B. Reddy y M. Rosen, «Geothermal heat pump system: Status review and comparison with other heating options,» vol. 101, pp. 341-348, 2013Applied Energy.
- [25] M. P. Hochstein, «Assessment and Modelling of Geothermal Reservoirs (Small utilization Schemes),» *Geothermics*, vol. 17, nº 1, pp. 15-49, 1988.
- [26] A. K. Martínez Florentino, M. V. Esteller, E. Dominguez Mariani, J. L. Expósito y J. Paredes, «Hydrogeochemistry, isotopes and geothermometry of Ixtapan de la Sal-Tonatico hot springs, Mexico,» *Environmental Earth Sciences*, vol. 78, p. 600, 2019.