

Estudio de isótopos estables (δD , $\delta^{18}O$) en líneas meteóricas locales y su relación con el agua termal-subterránea en la Cuenca Alta del Río Laja, Guanajuato, México

Stable isotopes (δD , $\delta^{18}O$) of local meteoric water lines and their relationship with thermal-groundwater in the Cuenca Alta del Río Laja basin, Guanajuato, Mexico

Lucía Magali Ramírez-González^{1*}, María Jesús Puy-Aquiza², Yanmei Li²

^{1*} Doctorado en Ciencia y Tecnología del Agua, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato. Guanajuato, México. CP. 36000. lmramirezgonzalez@ugto.com; maga.ramglez@gmail.com*

² Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. *Autor de correspondencia

Resumen

Se analizó la composición isotópica ($\delta^{18}O$ y δD) de la precipitación en tres estaciones al centro de la Cuenca Alta del Río Laja durante los años 2022 y 2023. Las regresiones de los datos dieron las siguientes ecuaciones de líneas meteóricas locales: precipitación 2022 $\delta D = 7.349 \delta^{18}O + 0.693$ y precipitación 2023 $\delta D = 4.72 \delta^{18}O - 7.175$. La línea meteórica local del 2022 es congruente con las líneas meteóricas mundial, mexicana y de la Cuenca de México. La línea meteórica local del 2023 refleja las condiciones del fenómeno meteorológico de El Niño, con composiciones isotópicas más pesadas. Las composiciones isotópicas de las aguas termales-subterráneas indican un origen meteórico, sin enriquecimiento en $\delta^{18}O$.

Palabras clave: Precipitación; El Niño; aguas termales.

Abstract

The isotopic composition ($\delta^{18}O$ and δD) of precipitation was analyzed in three stations in the central part of the Cuenca Alta del Río Laja basin during the years 2022 and 2023. Local precipitation follows the regressions: precipitation 2022 $\delta D = 7.349 \delta^{18}O + 0.693$ and precipitation 2023 $\delta D = 4.72 \delta^{18}O - 7.175$. The 2022 local meteoric water line is congruent with the global, the Mexican, and the basin of Mexico meteoric water lines. The 2023 local meteoric water line shows the El Niño signature with more positive delta values. The isotopic compositions of the thermal-groundwater suggest a meteoric origin without a significant $\delta^{18}O$ enrichment.

Keywords: Precipitation; El Niño; thermal waters.

Recibido: 05 de marzo de 2024

Aceptado: 27 de agosto de 2024

Publicado: 16 de octubre de 2024

Cómo citar: Ramírez-González, L. M., Puy-Alquiza, M. J., & Li, Y. (2024). Estudio de isótopos estables (δD , $\delta^{18}O$) en líneas meteóricas locales y su relación con el agua termal-subterránea en la Cuenca Alta del Río Laja, Guanajuato, México. *Acta Universitaria* 34, e4156. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2024.4156>

Introducción

La hidrología de isótopos estables es el estudio del agua utilizando los isótopos de deuterio (2H) y oxígeno-18 (^{18}O) que forman la molécula del agua. Los isótopos de deuterio y oxígeno-18 de las precipitaciones a nivel mundial siguen una correlación lineal conocida como la línea de agua meteórica global (LMG), desarrollada por Craig (1961) y definida por la ecuación $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$. La dispersión de los datos a lo largo de la LMG es influenciada por varios factores y procesos meteorológicos, por ejemplo, la temperatura y humedad atmosférica (Diamond, 2022). Otras variaciones respecto a la LMG pueden estar relacionadas con fenómenos climatológicos globales, como es el caso de El Niño–Oscilación del Sur (ENOS), el cual provoca tormentas en el Pacífico oriental y sequías en el Pacífico centro-occidental (World Meteorological Organization [WMO], 2023).

Una línea meteórica local (LML) se genera a partir de muestras de precipitación de una región específica con un rango limitado de condiciones climáticas; por lo tanto, la LML se considera representativa de los valores de entrada de isótopos estables del ciclo hidrológico local (Araguás-Araguás *et al.*, 2000). Al comparar las concentraciones y relaciones de isótopos estables del agua subterránea con el agua meteórica, se obtiene información sobre su origen, recarga, direcciones de flujo y evaporación; y en el caso de las aguas geotérmicas, se puede evaluar la interacción agua-roca (Diamond, 2022; Drever, 1997; Gerardo-Abaya *et al.*, 2000).

El área de estudio es la parte central de la Cuenca Alta del Río Laja (CARL), en el estado de Guanajuato, México (Figura 1). La CARL tiene un área aproximada de 7017 km². El río Laja da nombre a la cuenca y su cauce nace al noreste, en las Sierras de Santa Bárbara, Guanajuato y El Cubo, con elevaciones máximas de 2851 m. s. n. m., 2952 m. s. n. m. y 2853 m. s. n. m., respectivamente. Las corrientes superficiales son intermitentes en su mayoría y el cauce principal tiene dirección hacia el sureste hasta la presa Ignacio Allende (La Begoña) (1837 m. s. n. m.), donde se torna perenne hacia el Valle de Celaya (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 1998). El clima de la CARL es semiárido; la precipitación promedio en verano es de 3.38 mm y la temperatura media anual es de 17°C, siendo la mínima promedio de 9 °C en las partes altas de la cuenca y la máxima promedio de 25 °C en el centro (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2023a).

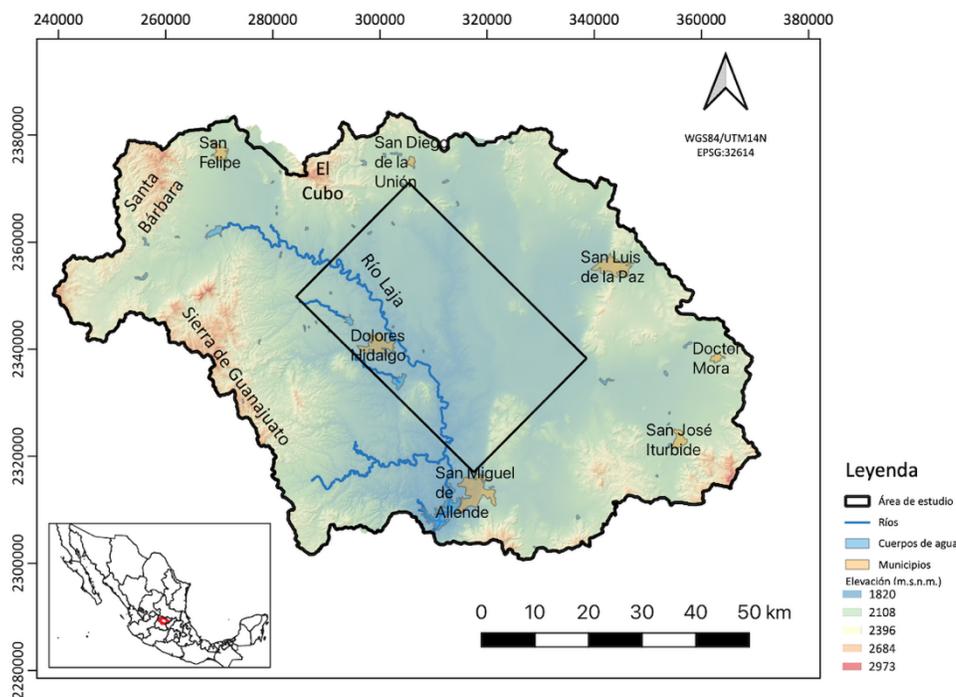


Figura 1. La Cuenca Alta del Río Laja. El área de estudio es la parte central de la cuenca y se encuentra contenida dentro del rectángulo negro. Valores de elevación tomados de INEGI (2021). Fuente: Elaboración propia.

La CARL no cuenta con una LML; por lo tanto, para el estudio de isótopos estables de agua subterránea en la cuenca, normalmente se utiliza la línea meteórica mexicana definida por: $\delta D = 7.5 \delta^{18}O + 6.1$ (Wassenaar *et al.*, 2009), o la línea meteórica de la Cuenca de México: $\delta D = 7.97 \delta^{18}O + 11.03$ (Cortés *et al.*, 1997).

Este estudio analiza las concentraciones de isótopos estables de la precipitación durante las temporadas de lluvia del año 2022 y 2023, recolectadas en tres estaciones al centro de la CARL. Las líneas meteóricas locales resultantes son utilizadas para analizar las relaciones de isótopos estables e interacción agua-roca de siete muestras de agua termal-subterránea del centro de la cuenca, cuyas temperaturas van de 29 °C a 47 °C.

Materiales y métodos

Para el análisis de los isótopos estables de la precipitación, se utilizaron tres estaciones al centro de la CARL (Figura 2). Durante la temporada de lluvia, un recolector se dejó captando la precipitación por alrededor de un mes en cada estación. En el 2022, la fecha de muestreo fue del 27 de junio al 30 de septiembre, mientras que en el 2023 la recolección de agua inició el 9 de julio y terminó el 03 de noviembre. La Tabla 1 muestra los intervalos de tiempo en los que el recolector estuvo en cada estación. La estación 3 del 2023 tuvo un intervalo de dos meses debido a que no hubo precipitación durante el primer mes.

Tabla 1. Periodo de medición en cada estación de precipitación.

Estación	Coordenadas EPSG:32614		Año 2022		Año 2023	
	X	Y	Inicio	Fin	Inicio	Fin
1	326570	2339728	27 - 06	26 - 07	09 - 07	10 - 08
2	306110	2348581	26 - 07	29 - 08	10 - 08	11 - 09
3	302240	2335072	29 - 08	30 - 09	11 - 09	03 - 11

Fuente: Elaboración propia

El recolector de agua de lluvia consistió en un recipiente de plástico blanco de 10 L, con una parte cóncava con agujeros pequeños en la parte superior; los bordes fueron aislados con silicón y el recolector fue colocado en superficies planas. Después del periodo de captación en cada estación, el agua fue almacenada en envases de polipropileno para ser enviada al laboratorio SLE Ciencias de la Tierra del CICESE, en Baja California, México, en donde fueron filtradas con una membrana de nitrato de celulosa de 0.45 μm de tamaño de poro y posteriormente analizadas por espectroscopia laser.

Se recolectaron además siete muestras de agua termal-subterránea proveniente de pozos agrícolas y balnearios con temperaturas entre 29 °C y 47 °C. La toma de muestras se llevó a cabo en dos etapas: la primera el 3 de noviembre del 2021 con la toma de muestras M-1, M-2, M-3 y M-4, y la segunda etapa el 16 de noviembre del 2022 con la toma de muestras M-5, M-6 y M-7. Las muestras fueron recolectadas en envases de polipropileno y enviadas para su análisis por espectroscopia laser al laboratorio SLE Ciencias de la Tierra del CICESE. La ubicación de las muestras de agua termal-subterránea se muestra en la Figura 2.

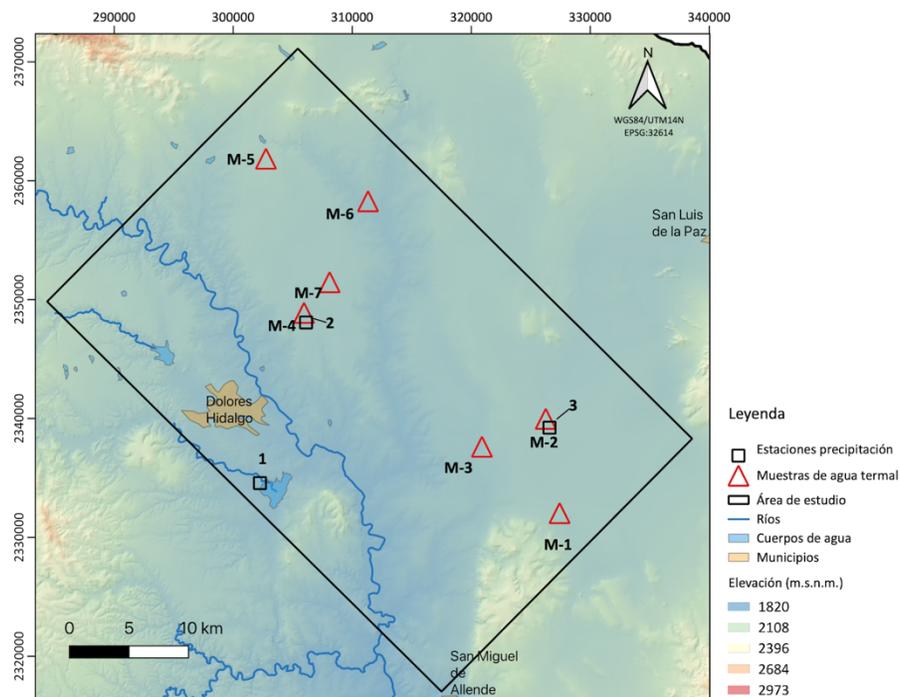


Figura 2. Localización de las tres estaciones de captación de la precipitación y de las siete muestras de agua termal-subterránea.
Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de la línea de agua meteórica local

Una línea de agua meteórica local es una regresión lineal para un conjunto de puntos x-y en el espacio. La regresión lineal está dada por la ecuación de la línea recta (ecuación 1):

$$y = mx + c \quad (1)$$

en donde m = pendiente de la línea, c = término independiente u ordenada al origen y x, y = variables en el plano cartesiano.

Al ser $\delta^{18}O$ y δD variables dependientes, el método de regresión adecuado es la regresión reducida del eje mayor (Diamond, 2022), también conocida como regresión estándar del eje mayor (*reduced/standard major axis* –RMA/SMA en inglés). La pendiente de la regresión reducida del eje mayor está definida por la expresión de la ecuación 2:

$$m_{RMA/SMA} = \sqrt{\frac{SS_y}{SS_x}} \quad (2)$$

en donde SS_x y SS_y son la suma de las desviaciones al cuadrado de la media de x, y (ecuación 3 y ecuación 4).

$$SS_y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$SS_x = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

La regresión de los datos de isótopos estables se llevó a cabo con el programa RStudio (2023.12.1+402), utilizando la paquetería lmodel2: Model II Regression.

Resultados

Los análisis de deuterio y oxígeno-18 son expresados en valores δ relativos al estándar VSMOW2 (*Vienna Standard Mean Ocean Water 2*) y se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis de $\delta^{18}O$ y δD de las muestras de precipitación y aguas termales-subterráneas recolectadas en este trabajo.

Muestra	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
1 (2022)	-2.558 ± 0.005	-18.307 ± 0.126
2 (2022)	-8.992 ± 0.014	-64.246 ± 0.105
3 (2022)	-10.222 ± 0.020	-75.36 ± 0.027
1 (2023)	-3.016 ± 0.016	-27.102 ± 0.094
2 (2023)	-4.617 ± 0.033	-23.829 ± 0.198
3 (2023)	0.552 ± 0.029	-4.018 ± 0.089
M-1	-9.797 ± 0.029	-71.536 ± 0.075
M-2	-10.286 ± 0.029	-74.286 ± 0.144
M-3	-10.321 ± 0.010	-74.797 ± 0.081
M-4	-8.94 ± 0.011	-66.743 ± 0.125
M-5	-10.206 ± 0.014	-71.028 ± 0.024
M-6	-10.822 ± 0.011	-75.537 ± 0.057
M-7	-7.716 ± 0.017	-55.477 ± 0.102

Fuente: Elaboración propia

Los valores de $\delta^{18}O$ y δD de las precipitaciones están en el rango de -10.222 ‰ a 0.552 ‰ y de -75.36 ‰ a -4.010 ‰, respectivamente. En las aguas termales, los valores de $\delta^{18}O$ varían de -10.822 ‰ a -7.717 ‰, mientras que el δD varía de -75.537 ‰ a -55.477 ‰.

Las líneas meteóricas locales de los años 2022 y 2023 están dadas por las siguientes ecuaciones (ecuación 5 y ecuación 6):

$$\text{Precipitación 2022 } \delta D = 7.349 \delta^{18}O + 0.693 \quad (R^2=0.99) \quad (5)$$

$$\text{Precipitación 2023 } \delta D = 4.72 \delta^{18}O - 7.175 \quad (R^2=0.82) \quad (6)$$

La Figura 3 muestra las líneas de agua meteórica del 2022 y 2023, así como la línea meteórica mundial (Craig, 1961), la línea meteórica mexicana (Wassenaar *et al.*, 2009) y la línea meteórica de la Cuenca de México (Cortés *et al.*, 1997), junto con las concentraciones de isótopos estables de las siete muestras de agua termal-subterránea.

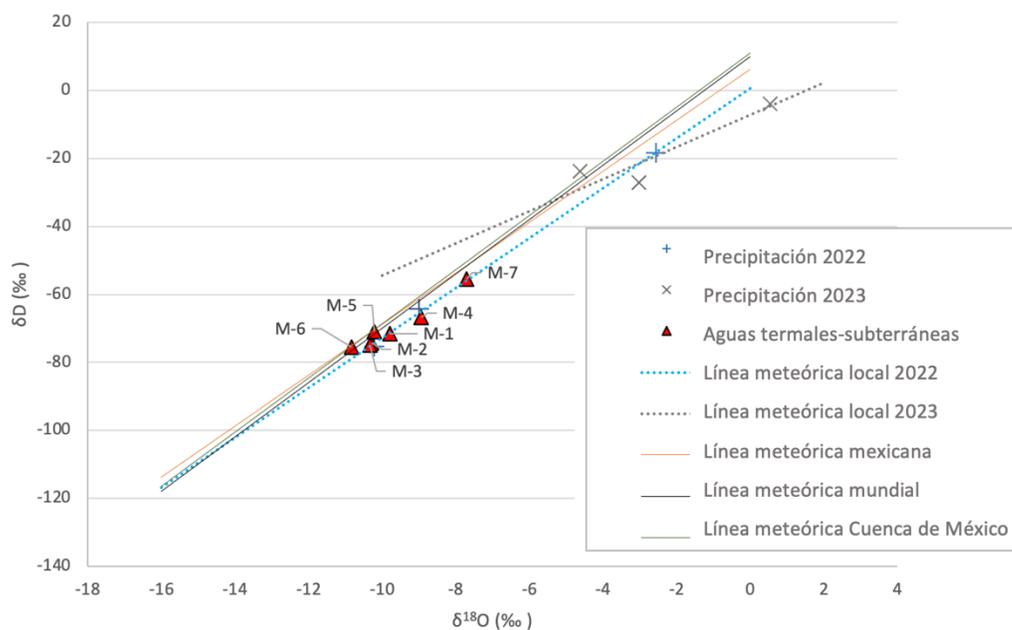


Figura 3. Isótopos estables de la precipitación (año 2022 y 2023) y aguas termales-subterráneas. También se grafican las líneas meteóricas locales (año 2022 y 2023), línea meteórica mexicana (Wassenaar *et al.*, 2009), línea meteórica mundial (Craig, 1961) y línea meteórica de la Cuenca de México (Cortés *et al.*, 1997).

Fuente: Elaboración propia.

La pendiente de la línea meteórica local 2022 es 7.349, valor similar a las pendientes de las líneas meteóricas mundial ($m = 8$), mexicana ($m = 7.5$) y de la Cuenca de México ($m = 7.97$). Sin embargo, la pendiente de la línea meteórica local 2023 es muy diferente, con un valor de 4.72; esta diferencia puede estar influenciada por fenómenos climatológicos globales que afectan las condiciones de precipitación normal en la CARL, por ejemplo, el fenómeno El Niño.

Discusión

Una línea meteórica local es fundamental para interpretar procesos relacionados con el ciclo hidrológico de una región específica. Idealmente se construye exclusivamente a partir de datos isotópicos de la precipitación en determinada área durante al menos tres años (Cortés *et al.*, 1997) para ser representativa, tomando en cuenta fluctuaciones relacionadas con fenómenos climatológicos globales, como el caso de El Niño (Diamond, 2022).

En julio del 2023, la Organización Meteorológica Mundial declaró el inicio de las condiciones del fenómeno meteorológico de El Niño–Oscilación del Sur (ENOS). El fenómeno de El Niño está asociado con el calentamiento de la superficie del océano Pacífico oriental ecuatorial, provocando tormentas en el pacífico oriental y sequías en el Pacífico centro-occidental con ocurrencia cada dos a siete años (WMO, 2023). El huracán Otis que entró a tierra el 25 de octubre en Acapulco, Guerrero, con categoría 5 (SMN, 2023b), fue producto de este fenómeno. En la CARL hubo lluvias torrenciales en esta fecha justo después de un periodo sin lluvia, y la estación 3 registró el evento con los valores más positivos de $\delta^{18}O$ y δD .

Normalmente, una mayor tasa de precipitación se traduce en composiciones isotópicas más ligeras (Diamond, 2022). Sin embargo, en la CARL el año 2023 se caracterizó por la ausencia de temporada de lluvia, y las pocas lluvias fueron torrenciales, descargando de la atmósfera únicamente las composiciones isotópicas más pesadas.

En cuanto a los valores de $\delta^{18}O$ y δD de las aguas termales, al compararse con las líneas meteóricas mundial, mexicana y de la Cuenca de México, se observa que las muestras M-5 y M-6 caen sobre las líneas meteóricas, y el resto (M-1, M-2, M-3, M-4 y M-7) cae ligeramente a la derecha, probablemente por efectos de evaporación. Sin embargo, tomando como referencia la línea meteórica del 2022, las muestras de agua termal tienen una mejor correlación. En cualquiera de los casos anteriores, la composición isotópica de las aguas termales-subterráneas indica un origen meteórico sin un enriquecimiento significativo en $\delta^{18}O$, como se observa en otras aguas geotérmicas (Diamond, 2022; Drever, 1997; Gerardo-Abaya *et al.*, 2000).

Se ha demostrado que los estudios de precipitación son más fiables para fines hidrológicos si tienen en cuenta periodos de tiempo largos (Cortés *et al.*, 1997), por lo que se recomienda seguir con el monitoreo de la composición isotópica de la precipitación en la cuenca en los años posteriores para así proponer una línea meteórica local de la Cuenca Alta del Río Laja.

Conclusiones

Las líneas meteóricas locales de los años 2022 y 2023 están dadas por las siguientes ecuaciones: Precipitación 2022 $\delta D = 7.349 \delta^{18}O + 0.693$ y Precipitación 2023 $\delta D = 4.72 \delta^{18}O - 7.175$. La pendiente de la línea meteórica local 2022 es 7.349, valor similar a las pendientes de las líneas meteóricas mundial ($m = 8$), mexicana ($m = 7.5$) y de la Cuenca de México ($m = 7.97$). La pendiente de la línea meteórica del 2023 es muy diferente ($m = 4.72$) debido a que las composiciones isotópicas fueron influenciadas por el fenómeno meteorológico de El Niño, arrojando los valores más positivos de $\delta^{18}O$ y δD . Las composiciones isotópicas de las aguas termales-subterráneas indican un origen meteórico, sin enriquecimiento en $\delta^{18}O$. Se recomienda continuar con el monitoreo de la composición isotópica de la precipitación en la cuenca en los años posteriores para poder construir una línea meteórica local de la Cuenca Alta del Río Laja.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2022 No. 74/2022 de la Universidad de Guanajuato. El primer autor agradece al Conahcyt por la beca de posgrado otorgada. Agradecemos el apoyo y colaboración en el resguardo del contenedor de agua de lluvia a Andri Már Sigurðsson, Iker Iñarritu, Juan Pablo Iñarritu y Rubén López.

Conflicto de interés

Los autores de este trabajo no presentan ningún conflicto de interés con ningún otro autor, centro de investigación o grupo de trabajo relacionado a la presente investigación.

Referencias

- Araguás-Araguás, L., Froehlich, K., & Rozanski, K. (2000). Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. *Hydrological Processes*, 14(8), 1341-1355. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20000615\)14:8<1341::AID-HYP983>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20000615)14:8<1341::AID-HYP983>3.0.CO;2-Z)
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Cortés, A., Durazo, J., & Farvolden, R. N. (1997). Studies of isotopic hydrology of the basin of Mexico and vicinity: annotated bibliography and interpretation. *Journal of Hydrology*, 198(1-4), 346-376. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03273-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03273-8)
- Diamond, R. E. (2022). *Stable isotope hydrology*. The Groundwater Project. <https://doi.org/10.21083/978-1-77470-043-3>
- Drever, I. J. (1997). *The Geochemistry of Natural Waters, Surface and Groundwater Environments*.
- Gerardo-Abaya, J., D'Amore, F., & Arnórsson, S. (2000). Isotopes for geothermal investigations. En S. Arnórsson (ed.), *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration development and use: sampling methods, data handling, interpretation* (pp. 49-65). International Atomic Energy Agency.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1998). *Estudio hidrológico del Estado de Guanajuato*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825222253>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). *Continuo de Elevaciones Mexicano*. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2023a). *Normales climatológica por Estado: Guanajuato*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=gto>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2023b). *Aviso de Ciclón Tropical en el Océano Pacífico. No. Aviso: 23*. https://smn.conagua.gob.mx/es/?option=com_visforms&view=visformsdata&layout=data&id=107&cid=5715
- Wassenaar, L. I., Van Wilgenburg, S. L., Larson, K., & Hobson, K. A. (2009). A groundwater isoscape (δD , $\delta^{18}O$) for Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 102(3), 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.01.001>
- World Meteorological Organization (WMO). (2023). *World Meteorological Organization declares onset of El Niño conditions* [Comunicado de prensa]. <https://wmo.int/es/node/21584>