



Caracterización hidrogeoquímica a partir de datos históricos del sistema de flujo de aguas subterráneas Cuitzeo

Historical compilation and hydrochemical behavior in the groundwater flow system Cuitzeo

Aurora Guadalupe Llanos Solís ¹ , Selene Olea Olea ²

¹ Universidad Nacional Autónoma de México, Licenciatura en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

² Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Dinámica Terrestre Superficial, Instituto de Geología, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

Resumen

Este trabajo presenta un análisis detallado y fundamentado del Sistema de Flujo de Aguas Subterráneas (SIRAS) Cuitzeo, a partir de datos históricos de 11 años discontinuos. El objetivo es la creación de un modelo hidrogeológico conceptual que permita entender la dinámica del agua subterránea en la región, a partir de escenarios espaciales y temporales. La metodología se basó en análisis hidrogeoquímico con el uso de diagramas y análisis estadísticos con clúster y modelos de mezcla que permiten obtener conocimiento sobre los procesos de interacción agua-roca de la zona y sugerir las áreas donde sucede la recarga y descarga. Con los resultados se identificaron las componentes de flujo; local, intermedio y dos regionales, y que el agua que predomina corresponde a bicarbonatadas cálcicas-magnésicas y bicarbonatadas sódicas.

Palabras clave: hidrogeoquímica, agua subterránea, sistema de flujo.

Abstract

This study shows a detailed and informed analysis from the Groundwater Flow System (GFS) Cuitzeo, based on historical data of 11 discontinuous years. The objective is to create a conceptual hydrogeological model that allows for understanding groundwater dynamics in the region based on spatial and temporal scenarios. The methodology was based on hydrogeochemical analysis using diagrams and statistical analyses with clusters and mixing models. This provides insight into the water-rock interaction processes in the area and suggests areas where recharge and discharge occur. Based on the results we identified the flow components; local, intermediate and two regionals. The predominant water types are calcium-magnesium bicarbonate and sodium bicarbonate.

Key words: Hydrogeochemistry, groundwater, flow system.

Introducción

El estudio del agua subterránea desde la visión de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (SIRAS) permite comprender de manera integral el funcionamiento hidrológico de un sistema que se encuentre integrado por diferentes componentes o trayectorias de flujo. En México se delimitaron 65 sistemas de flujo entre ellos el Sistema Cuitzeo (Escolero, 2018).

El SIRAS Cuitzeo se encuentra localizado en la parte central de México (**Figura 1**), abarca una extensión de 5208 km², extendiéndose principalmente en el estado de Michoacán y contiene dos de los lagos más grandes del país: el Lago de Cuitzeo y el Lago de Pátzcuaro. Se encuentra dentro del sistema de fallas Morelia Acambay, el cual es una franja con 30 km de extensión conformado por fallas con dirección OSO-ENE (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 25 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto de 2026

✉ Autor para correspondencia

Aurora Guadalupe Llanos Solís

aurorallanos@ciencias.unam.mx

Como citar

Llanos Solís AG, Olea-Olea S (2026). Caracterización hidrogeoquímica a partir de datos históricos del sistema de flujo de aguas subterráneas Cuitzeo. *Ciencia Nicolaita* 97:174-180. doi:[10.35830/cn.vi97.950](https://doi.org/10.35830/cn.vi97.950)

La importancia del uso del agua subterránea en México se debe a que es la principal fuente de abastecimiento de agua potable, sobre todo en zonas áridas (CONAGUA, 2015). En el caso del SIRAS Cuitzeo este contiene más del 20% de la población del estado de Michoacán donde se incluye la ciudad de Morelia, al igual que comprende una de las regiones agrícolas más importantes del estado,

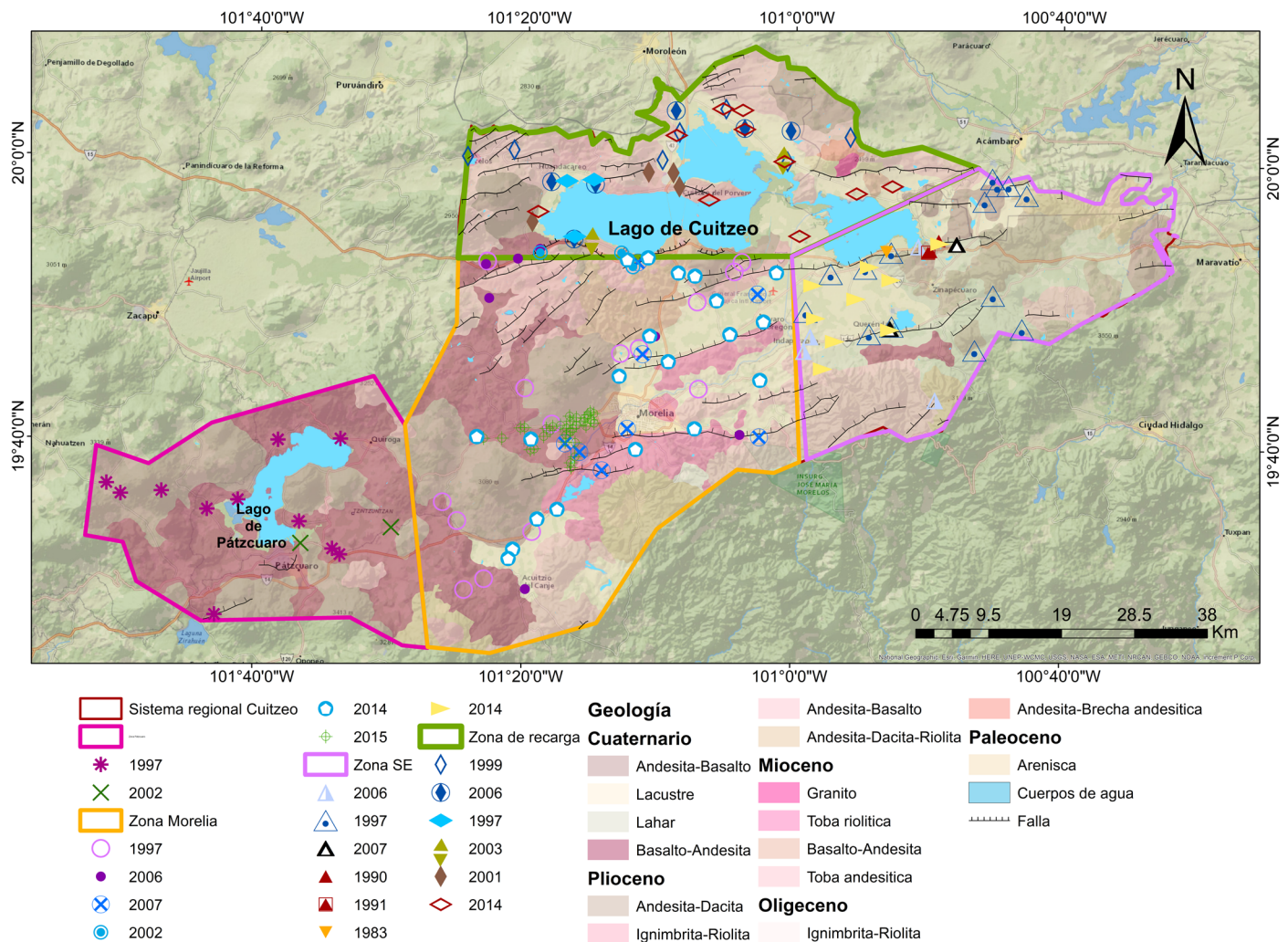


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

la cual aportó el 13.75% de la producción a nivel nacional en el año 2019 (RAM, 2018).

Sin embargo, el crecimiento actual tanto en población como en la actividad agrícola e industrial de la región ha tenido como consecuencia un alza en la demanda de agua y alimentos, afectando así la calidad del agua de los cuerpos superficiales, lo que ha provocado un incremento en la explotación del agua subterránea a través de diversos manantiales, norias y pozos profundos (Rodríguez-Castro *et al.*, 2014).

Desafortunadamente, no se cuenta con información clara de la calidad y disponibilidad del recurso subterráneo en el SIRAS Cuitzeo, por lo que recopilar datos históricos de la hidrogeoquímica brinda la posibilidad de comprender el sistema desde la visión histórica.

El objetivo principal de este trabajo es generar un modelo hidrogeológico conceptual que permita entender la dinámica del agua subterránea en la región, a partir de escenarios espaciales y temporales. Los objetivos particu-

lares son: a) identificar las variaciones hidrogeoquímicas en el sistema y b) delimitar y comprender las trayectorias de flujo en el sistema.

Materiales y métodos

La metodología se dividió en cuatro etapas (**Figura 2**):

1. Recopilación de datos fisicoquímicos e hidrogeoquímicos para un periodo alternado de 11 años: 1983, 1990, 1997, 1999, 2001, 2002, 2003, 2006, 2007, 2014 y 2015 (Bischoff *et al.*, 2004; CONAGUA, 2023a, 2023b, 2023c; INEGI, 2014; Medina, 2008; Pérez Villarreal *et al.*, 2019; Segovia *et al.*, 2005; Viggiano Guerra y Gutiérrez Negrin, 2003), donde se obtuvieron 170 sitios de muestreo de agua subterránea en el SIRAS Cuitzeo que incluyen: temperatura, pH, Conductividad Eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), así como los io-

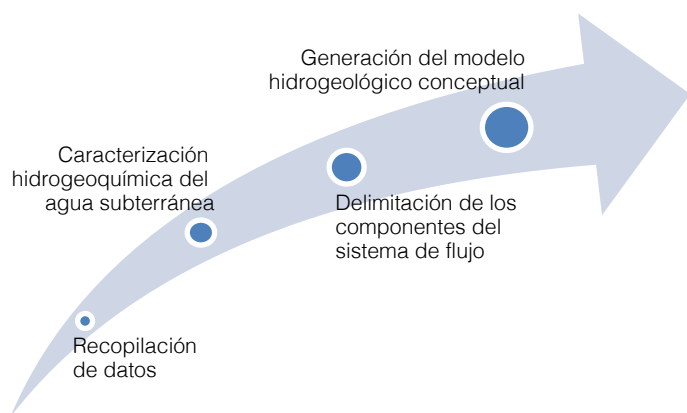


Figura 2. Metodología usada para la caracterización hidrogeoquímica del SIRAS Cuitzeo.

nes mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} y NO_3^-). Se verificó que todos los datos cumplieran con una distribución normal y su error de análisis no fuera mayor a 10% al momento de realizar un balance iónico (Freeze y Cherry, 1979).

2. Se realizaron diagramas hidrogeoquímicos de Piper (1948) y Mifflin (1968), que permitieron ver la dispersión de los datos por zonas del SIRAS con todos los datos históricos.
3. Se realizaron análisis estadísticos del año 2014 ya que cubrían la mayor área del SIRAS Cuitzeo. Esto con la finalidad de agrupar los datos y observar tendencias.

Primero se llevó a cabo un análisis de clúster jerárquico (Ward, 1963) en RStudio, se seleccionó la base de datos con mayor distribución en el SIRAS. Las variables fueron: temperatura, STD, pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} y NO_3^- . Posterior al análisis se emplearon los diagramas hidrogeoquímicos y se pudo observar una mezcla en los grupos. Por lo que el segundo paso fue realizar un Análisis de Mezcla de Miembros Extremos (AMME) (Christophersen y Hooper, 1962), el análisis AMME se llevó a cabo en el software MIX (Carrera *et al.*, 2004). Se determinaron 4 fuentes extremas con el gráfico de STD vs $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^-$. Se usaron 7 especies (T, STD, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} y NO_3^-) en mg/L, en donde se omitieron Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ debido a que se identificó que se tiene intercambio iónico en el sistema. Los grupos asignados se usaron para generar diagramas hidrogeoquímicos.

4. Por último, se generó un mapa de la distribución de grupos resultantes del AMME, teniendo como resultado el modelo hidrogeológico conceptual.

Resultados y discusión

Los resultados hidrogeoquímicos que se obtuvieron por zonas (Zona Pátzcuaro, Zona Morelia, Zona SE y Zona de recarga) (**Figura 3a-d**) permiten identificar mayoritariamente familias de agua bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas tanto como bicarbonatadas sódicas. En menor proporción, se encontraron algunos sitios que corresponden a aguas cloruradas, las cuales están ubicadas sobre fallas y en cercanías del Lago de Cuitzeo.

Los resultados obtenidos del AMME realizado con datos del año 2014, permitieron la delimitación de las trayectorias de flujo, donde grupo 1 es local, grupo 2 intermedio, grupo 3 regional 1 y grupo 4 regional 2. En el diagrama de Piper (**Figura 4a**) donde se observan mayormente aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas para el grupo 1 y 2, lo que cumple con las características de flujos locales, mientras que el grupo 3 y 4 presentan un mayor contenido de iones, en este caso las aguas presentan una composición más cercana a las aguas sulfatadas-cloruradas-sódicas lo que indica que las componentes son más evolucionadas, marcándolas nuevamente como regionales. En el diagrama de Mifflin (**Figura 4b**) se observa la distribución de las 4 componentes, siendo la menos evolucionada la local, seguida de las intermedias y regionales. Con esta información se propone un modelo hidrogeológico conceptual del SIRAS, en donde se muestran las direcciones de flujo propuestas por Escolero (2018).

La componente local tiene la mayor concentración de Mg^{2+} y bajo contenido de STD, la trayectoria intermedia tiene valores altos para Ca^{2+} y K^+ , mientras que las trayectorias regionales presentan los valores más altos para STD y CE diferenciándose por sus concentraciones de iones, ya que el regional 1 predomina en Cl^- y SO_4^{2-} mientras que el regional 2 tiene la mayor concentración para los iones Na^+ y HCO_3^- . También se identificó que las componentes locales e intermedia están mezcladas.

De acuerdo con los datos históricos recopilados (1983-2015), los procesos que dominan la evolución del agua subterránea son principalmente el intercambio iónico y la disolución de minerales (**Figura 5**). Esto se reportó anteriormente por Gómez (2020). Con lo anterior se observa que el agua subterránea presenta un enriquecimiento conforme circula por las rocas dentro del sistema, en este caso rocas volcánicas y depósitos lacustres, que aportan minerales ricos en Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , SiO_2 , Mg^{2+} , Cl^- (Morales *et al.*, 2015).

Esta evolución comienza con la presencia de aguas de reciente infiltración (bicarbonatadas mixtas) que entran al sistema principalmente en los límites externos del sistema, sobre todo en la zona norte al Lago de Cuitzeo, al límite

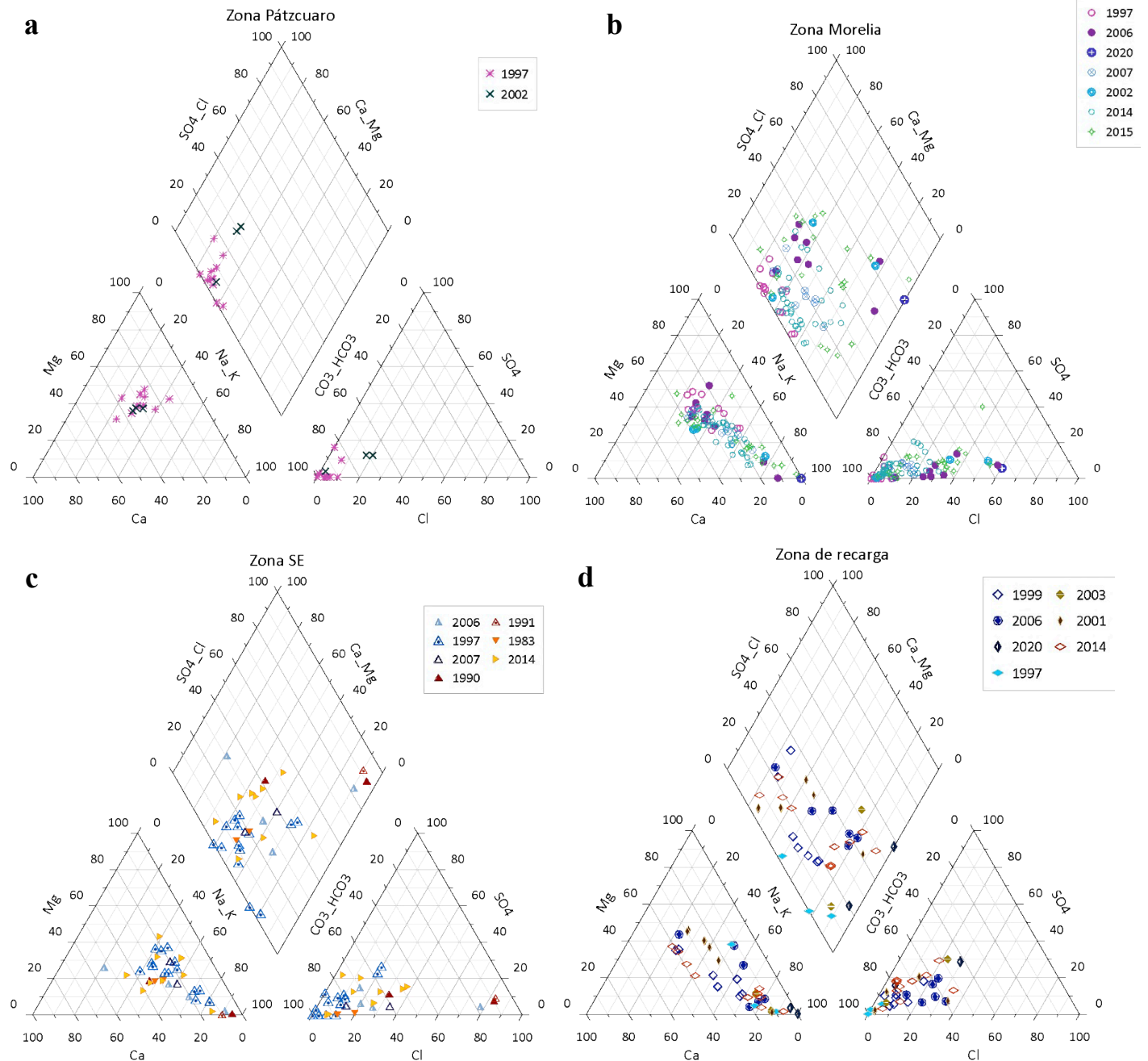


Figura 3. Diagramas de Piper **a)** Zona Pátzcuaro, las muestras se encuentran en el área de agua bicarbonatada cálcica y/o magnésica. **b)** Zona Morelia, las muestras se encuentran en el área de agua bicarbonatada cálcica y/o magnésica migrando hacia bicarbonatada sódica. **c)** Zona SE, las muestras se encuentran en el área de cambio entre el agua bicarbonatada cálcica y/o magnésica migrando hacia bicarbonatada sódica. **d)** Zona de recarga, las muestras se encuentran distribuidas en el área correspondiente a aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas al igual que bicarbonatadas sódicas.

sureste y en el área inferior del sistema donde se encuentra el Lago de Pátzcuaro, donde se tienen aportes de agua de origen meteórico. Lo anterior coincide con lo propuesto por CONAGUA (2023) donde establece que la precipitación es la principal fuente de recarga en esta zona, la cual se infiltra por las montañas y valles de su alrededor, que están conformados por rocas volcánicas intercaladas con abanicos fluviales teniendo así gran permeabilidad permi-

tiendo el flujo del agua.

Esta agua se va enriqueciendo mientras se desplaza al Lago de Cuitzeo donde se tienen aguas cloruradas/sulfatadas sódicas, las cuales aparte del enriquecimiento natural del agua subterránea por las rocas en las que circula, podrían tener aportes de fluidos hidrotermales debido a la presencia de fallas, teniendo así una mezcla de aguas de mayor profundidad con aguas de reciente infiltración

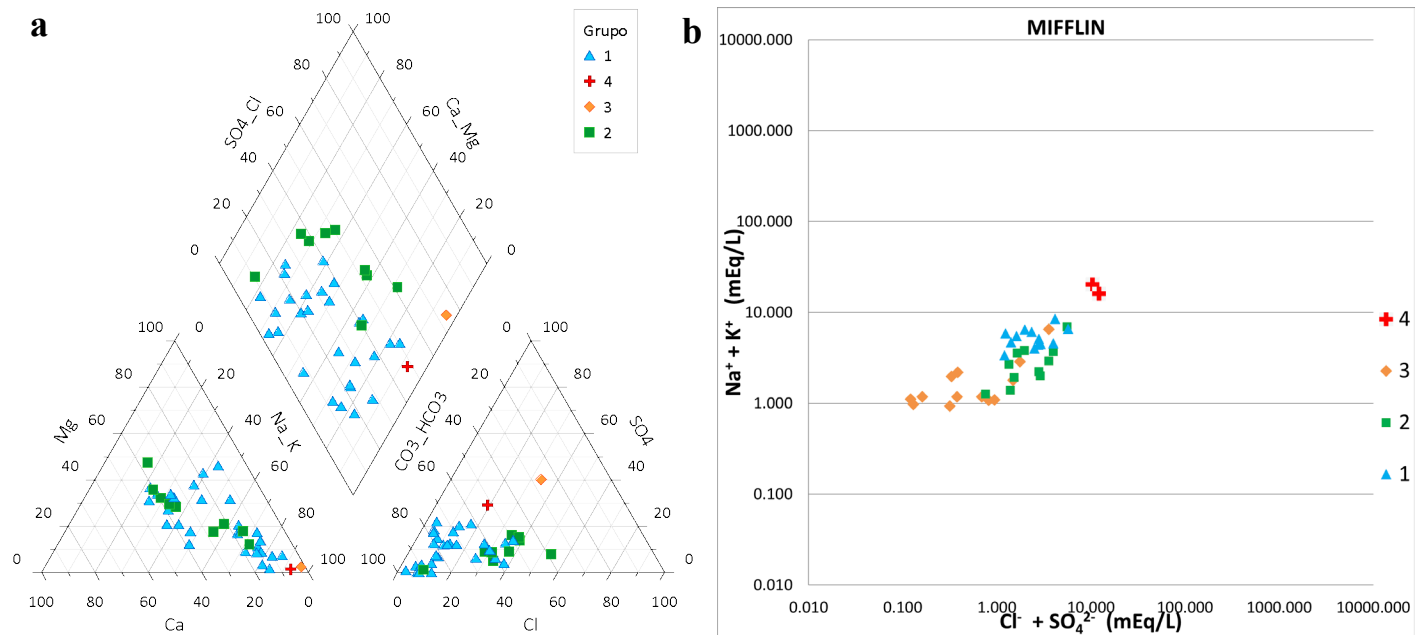


Figura 4. a) Diagrama de Piper que muestra la distribución de las trayectorias de flujo para el año 2014. El grupo 1 y 2 se encuentran en la zona de aguas bicarbonatadas mixtas mientras que el grupo 3 y 4 tienden hacia la zona de aguas sulfatadas-cloruradas-sódicas. b) Diagrama de Mifflin que muestra la distribución de las componentes, en ambos diagramas el grupo 1 corresponde a la componente local, el grupo 2 a la intermedia y los grupos 3 y 4 a las regionales.

(Viggiano y Gutiérrez, 2003).

El modelo hidrogeológico conceptual muestra la distribución espacial de las componentes o trayectorias de flujo en el SIRAS Cuitzeo. La línea roja corresponde con un flujo regional, la verde con un flujo intermedio y la azul a un flujo local (**Figura 6**).

Es importante mencionar que las dos componentes regionales podrían tener procesos evolutivos diferentes debido a que su composición iónica difiere, esto podría explicarse debido a las fallas del sistema, que podrían estar provocando que ascienda agua de mayor profundidad, y, por lo tanto, tenga una mayor temperatura, lo que afectaría procesos como lo son la hidrólisis, el intercambio iónico, entre otros. También se observa como las componentes regionales se encuentran en cercanías del Lago de Cuitzeo, el cual corresponde al nivel de base de descarga global del sistema.

El estudio del agua subterránea a través de este modelo conceptual servirá como una base en el futuro a la interpretación de procesos que tengan que ver con contaminación antropogénica, gestión del recurso, debido a que ya se tiene un conocimiento general técnico dentro del sistema, de la información que falta generar y que podría mejorar el entendimiento integral del SIRAS Cuitzeo.

Conclusiones

Para el caso de este sistema es importante no perder de vista las fallas de la zona, ya que podría aportar al entendimiento de la mezcla que sucede entre componentes. De igual forma, teniendo ya una primera recopilación e interpretación del agua subterránea, podemos comenzar a buscar y estudiar otros aspectos que intervengan como lo puede ser la posible contaminación agrícola de la zona, contaminación antrópica, etc.

Realizar una primera caracterización hidrogeoquímica a partir de datos recopilados de un SIRAS es primordial si se quiere comenzar a aplicar esta delimitación para nuestro país, ya que de esta manera se genera un conocimiento previo del comportamiento del agua subterránea, permitiendo tener datos con continuidad que sirvan a futuro para campañas de campo posteriores.

Esta metodología puede ser replicada para otros estudios que busquen realizar una caracterizar base de información hidrogeoquímica de sitios y que no se tengan datos actualizados, ya que de manera general se muestran recursos que permiten la selección de datos y la obtención de resultados representativos para un área a estudiar.

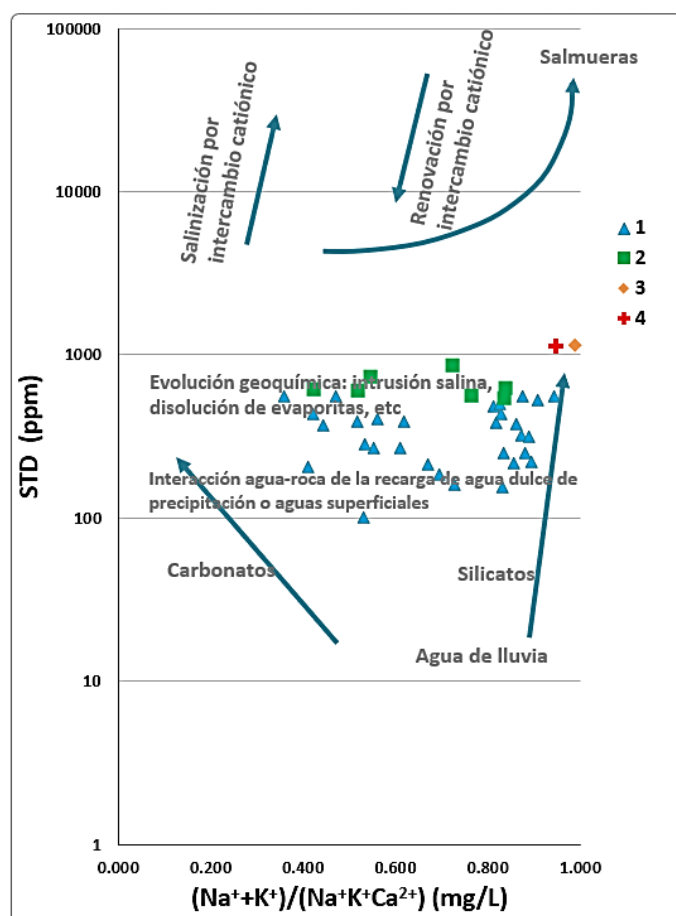


Figura 5. Diagrama de Gibbs con la clasificación de los grupos obtenidos del AMME. El grupo 1 y 2 no sobrepasan los 1000 ppm de STD y se mantienen en la zona de interacción agua roca, mientras que el grupo 3 y 4 si sobrepasan esta medida y tienden mayormente a la evolución geoquímica.

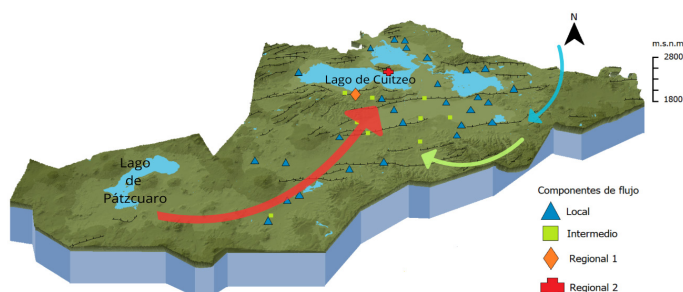


Figura 6. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema de Flujo Cuitzeo. Tenemos la distribución de los sitios identificados por componentes, al igual que las fallas que existen dentro del sistema.

Agradecimientos

Proyecto PAPIIT N° IA101924 “Aplicación de un enfoque multifactorial para comprender los procesos hidrogeológicos ambientales en el agua subterránea y los cuerpos con los que tiene conectividad hidrológica: caso de estudio sistema de flujo Cuitzeo”.

Proyecto PAPIIT N° IA102526. "Evaluación de los cambios estacionales e impactos ambientales de la componente local del Sistema Regional de Agua Subterránea (SIRAS) Cuitzeo, en el centro de México."

A la M.C. Zaida Martínez Casas del Instituto de Geología, UNAM, por su apoyo en la realización de los gráficos y figuras.

Referencias

Bischoff JL, Israde-Alcántara I, Garduño-Monroy VH, Shanks WC (2004). The springs of Lake Pátzcuaro: chemistry, salt balance, and implications for the water balance of the lake. *Applied Geochemistry* 19(11). doi:10.1016/j.apgeochem.2004.04.003

Carrera J, Vázquez-Suñé E, Castillo O, Sánchez-Vila X (2004). A methodology to compute mixing ratios with uncertain end-members. *Water Resources Research* 40(12). doi:10.1029/2003WR002263

Christophersen N, Hooper RP (1992). Multivariate analysis of stream water chemical data: the use of principal components analysis for the end-member mixing problem. *Water Resources Research* 28(1): 99–107. doi:10.1029/91WR02518

CONAGUA (s.f.). Aguas subterráneas. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/agua-subterranea> [consultado el 31 de julio de 2025]

CONAGUA (2023a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Lagunillas-Pátzcuaro (1604), Estado de Michoacán. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/michoacan/DR_1604.pdf

CONAGUA (2023b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Maravatío-Contepec-E. Huerta (1601), Estado de Michoacán. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/michoacan/DR_1601.pdf

CONAGUA (2023c). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/michoacan/DR_1602.pdf

Escolero-Fuentes OA (2018). Sistemas regionales de flujo de agua subterránea en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 402 p.

Freeze RA, Cherry JA (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 604 p.

Gómez Cruz K (2020). Estudio de la hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea en la cuenca del lago de Cuitzeo. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 86 p.

Gómez-Tuena A, Orozco-Esquivel MT, Ferrari L (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 57(3): 227–283. doi:10.18268/bsgm2005v57n3a2

INEGI (2014). Zona hidrogeológica Morelia-Queréndaro. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463654520>

Medina Vega VH (2008). Estudio geológico, geofísico e hidrogeoquímico para generar un modelo conceptual del acuífero de Cuitzeo, Michoacán, México. Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Mifflin MD (1968). Delineation of Ground-Water Flow Systems in Nevada. University of Nevada. <https://www.nrc.gov/docs/ML0330/ML033030350.pdf>.

Morales I, Villanueva-Estrada RE, Rodríguez R, Armienta MA (2015). Geological, hydrogeological, and geothermal factors associated with the origin of arsenic, fluoride, and groundwater temperature in a volcanic environment: El Bajío Guanajuatense, Mexico. *Environmental Earth Sciences* 74(6):5403–5415. doi:10.1007/s12665-015-4554-9

Pérez Villarreal J, Ávila Olivera JA, Israde-Alcántara I, Buenrostro Delgado O (2019). Nitrate as a parameter for differentiating groundwater flow systems in urban and agricultural areas: the case of the Morelia-Cápula area, Mexico. *Hydrogeology Journal* 27(5). doi:10.1007/s10040-019-01933-0

Piper AM (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 25

(6):914–928. doi:10.1029/TR025i006p00914

RAM (Representación AGRICULTURA Michoacán) (s.f.). Michoacán, líder en valor de la producción agrícola por noveno año consecutivo. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/michoacan/articulos/michoacan-lider-en-valor-de-la-produccion-agricola-por-noveno-ano-consecutivo> [consultado el 31 de julio de 2025]

Rodríguez Castro JC, Silva Corona JJ, García Acevedo R, Ruíz Chávez R (2012). Disponibilidad de las aguas subterráneas en el valle Morelia-Queréndaro. En: Contribuciones para el desarrollo sostenible de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán, pp. 25–31. Editorial del CIGA. doi:10.22201/CIGA.9786070229145P.2012

Segovia N, Barragán RM, Alfaro R, Arellano VM, Mena M (2010). Fluid-mineral equilibrium of spring waters at Cuitzeo Basin (Mexico) geothermal zone. World Geothermal Congress.

Viggiano Guerra JC, Gutiérrez Negrin LCA (2003). Régimen de flujo hidrotermal en la zona geotérmica de Araró, Michoacán, México. *Ingeniería Hidráulica en México* 18(1):39–53

Ward JH (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association* 58(301):236–244. doi:10.1080/01621459.1963.10500845